SCIENCES ET AVENIR

Groenland
UN TRÉSOR GÉOLOGIQUE

p.6

• Diagnostic • santé mentale • traitements...

IA

Comment elle révolutionne LA SANTÉ

p.50

©SHUTTERSTOCK. PHOTOMONTAGE SETA

SCIENCES ET AVENIR - N° 949 - MARS 2026 - IA ET SANTÉ

MARS 2026 - N° 949 - BEL 5,70€ - LUX 5,70€ - CH 9,50CHF - D 7,40€ - IT 5,70€ - ESP 5,70€ - GR 5,70€ - PORT-CONT 5,70€ - DOM 5,80€ - NCAL 800XPF - MAR 55MAD - TUN 11TND - CAN 8,20$CAD

L 13418 - 949 S - F: 5,30 € - RD

L'ÉCOLE
des Arts
Joailliers

Avec le soutien
de Van Cleef & Arpels

Rêveries de pierres

Poésie et minéraux de Roger Caillois

Exposition

Entrée gratuite
16 bis boulevard Montmartre
75009 Paris

Photo : François Farges

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE

6 nov. 2025
29 mars 2026

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

L'algorithme propose, le médecin dispose

À force de parler de « révolution », le mot s'use. Et pourtant ! En matière de santé, l'irruption de l'intelligence artificielle n'a rien d'un simple effet d'annonce. Elle est déjà à l'œuvre dans les services d'imagerie, dans les laboratoires d'oncologie, dans les cabinets de médecine générale, et jusque dans les conversations nocturnes d'internautes en détresse.

Le mouvement est massif. Il traverse toute la chaîne du soin : du diagnostic à la prévention, du bloc opératoire à la modélisation épidémique, du parcours individuel à la santé publique. *« Je crois au concept de médecin augmenté »*, affirme sans hésiter Bernard Nordlinger, spécialiste de l'IA à l'Académie nationale de médecine *(p. 52)*. Augmenté, et non remplacé. Voilà l'enjeu.

Le médecin augmenté restera d'abord un médecin, sans jamais renoncer à sa distance critique

Car l'IA est un plus — certainement pas une manière de faire moins. N'en déplaise à certains, il faudra continuer à faire des études. Longues. Exigeantes. Le médecin augmenté restera d'abord un médecin. Et il devra, en plus, se former à ces outils pour en faire un usage éclairé, sans jamais renoncer à sa distance critique.

L'algorithme propose. Le médecin dispose. Le patient, lui aussi, a déjà franchi le pas. Plus de 200 millions de personnes interrogent chaque semaine des modèles de langage sur leur santé. Simples d'usage, disponibles à toute heure, ces outils s'invitent dans l'intimité des doutes et des angoisses. Le grand dossier de 20 pages que nous vous proposons ce mois-ci explore cette ligne de crête. Ni fascination naïve, ni technophobie stérile. Nous avons interrogé chercheurs, cliniciens, psychiatres, épidémiologistes. Examiné les succès déjà validés — en radiologie notamment — et les promesses encore fragiles. Scruté les usages concrets, les essais cliniques en cours, les partenariats industriels, les jumeaux numériques en gestation. La médecine entre dans une nouvelle ère. À nous de veiller à ce qu'elle reste profondément humaine. ■

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél.: 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements: France, 1 an simple (11 numéros dont un double): 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries): 48 €. Étranger: nous consulter.
Abonnements Belgique: Edigroup: tél. 00.32.70.233.304
Abonnements Suisse: Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction:
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél.: 01.55.35.56.01.
E-mail: redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet: sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (environnement, évolution) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueur Jean-Gabriel GANASCIA
Ont participé à ce numéro : T. de BASTARD, J. BOUGHON, T. BRAJARD, C. GOYA, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, M. PARRA, H.-P. PENEL, A. VERNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Creatoprint
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél.: 01.44.88.97.70. Fax: 01.44.88.97.79
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution Émilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Les Éditions Croque Futur SAS au capital de 10 100 000 euros associé UFIPAR (LVMH) - 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Président et directeur de la publication Maurice SZAFRAN
Directeur général Thierry MASSÉ

Ce magazine est imprimé chez RotoFrance, 25, rue de la Maison Rouge 77185 Lognes
Origine du papier: Allemagne - Taux de fibres recyclées: 0 %
Eutrophisation: PTot = 0,018 kg/tonne de papier

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC
10-31-1557
pefc-france.org

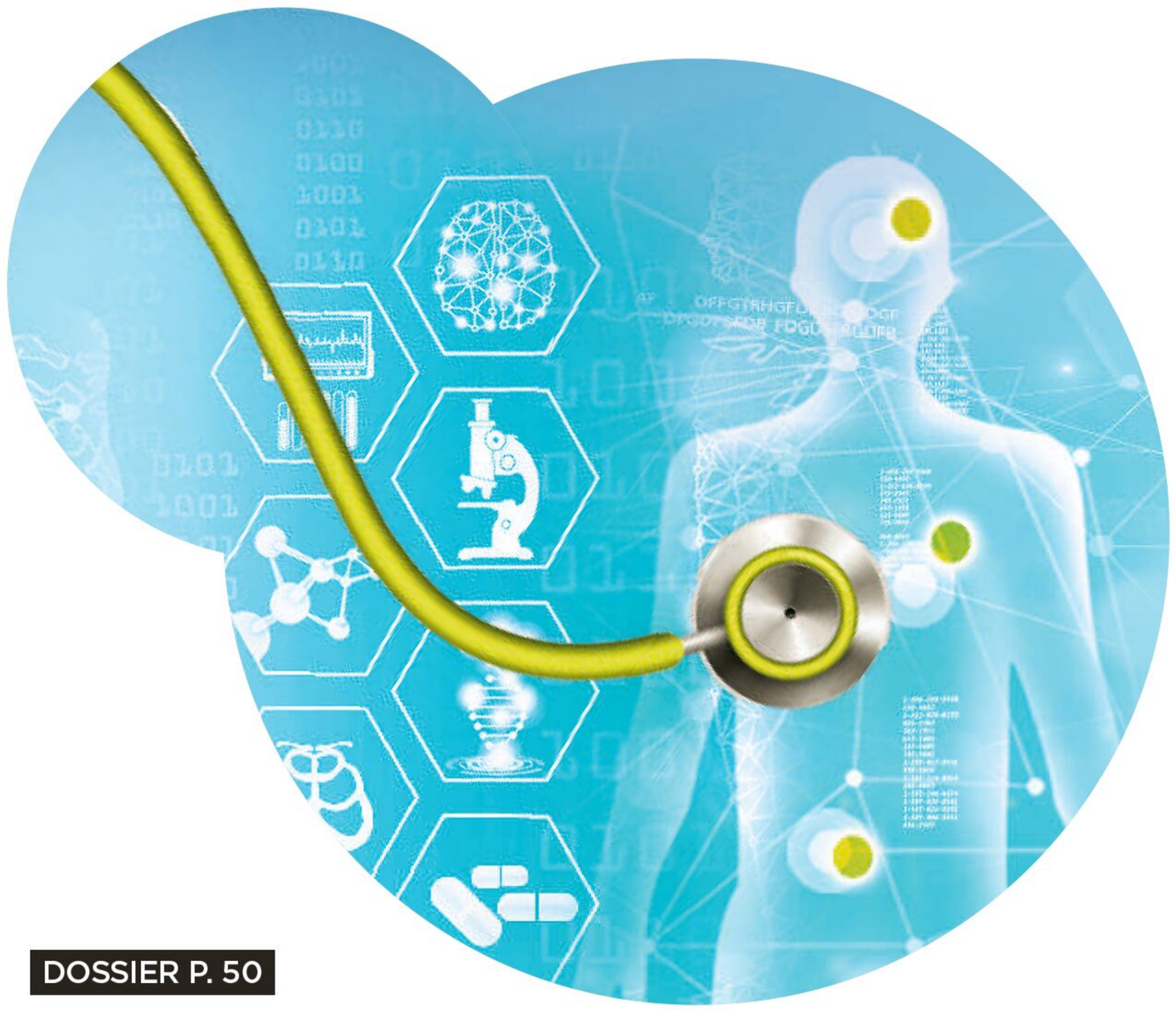
FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte: la lettre « Sciences et Avenir bienvenue aux abonnés », les messages « Challenges réservée aux abonnés de Sciences et Avenir » et les encarts « Sophia Boutique - Montre Vuillemin Regnier » et « Montre Spirit Of Saint Louis » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion.
Commission paritaire n° 1126 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 949 / Mars 2026



DOSSIER P. 50

IA La révolution dans la santé

Prédiction de maladies, aide au diagnostic, consultation psy, traitements, modélisation des épidémies… L'IA générative va devenir un outil incontournable pour les professionnels de la santé. À condition que le corps médical conserve la décision finale.

P. 6

Les enjeux du contrôle du Groenland

Pourquoi Donald Trump veut-il annexer ce territoire ? Il offre des ressources clés pour les nouvelles technologies et l'accès aux futures routes maritimes à la faveur de la fonte des glaces.

P. 38

Le dernier mystère du peuple migrateur

Un grand nombre d'espèces migrantes utilisent le champ magnétique terrestre pour s'orienter. Des chercheurs ont fait une avancée majeure dans la compréhension de ce mystérieux sixième sens.

P. 78

Bio-inspiration : la paléontologie, source d'innovation

De la carapace du glyptodon aux ailes des ptérosaures, l'analyse poussée de fossiles fournit un nouveau champ d'étude pour l'ingénierie, la robotique ou l'architecture. Panorama.

3 **Édito**

ÉVÉNEMENT

6 **Les enjeux du contrôle du Groenland**

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** Une vie possible dans l'ombre radioactive d'Europe / Un métal rendu insubmersible

26 **Journal de l'IA : L'IA en proie à un « abrutissement »**

28 **Spintronique : l'électronique gagne en rapidité et en sobriété**

33 **Sophie Adenot, cobaye de l'espace**

36 **Les feux follets traqués par la science**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Les ours polaires du Svalbard vont bien / Des tomates qui orchestrent leur défense

38 **Guidage magnétique : le dernier mystère du peuple migrateur**

43 **Une éolienne en plein ciel**

44 **Sauver le pernambouc sans perdre l'archet**

48 **Un sanctuaire pour les archives glaciaires**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** L'appendicite se guérit par des antibiotiques / Des bactéries se logent dans les calculs rénaux

70 **Apnée du sommeil : l'implant qui soulage**

75 **La maladie d'Alzheimer existait déjà à la préhistoire**

76 **Nutrition : La face cachée des arômes alimentaires**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** La plus vieille peinture rupestre au monde / Le T. rex revoit sa courbe de croissance

78 **Bio-inspiration : la paléontologie, source d'innovation technique**

84 **Un nouvel éclairage sur les rites funéraires des Romains**

86 **Histoire des sciences : L'abeille, le parasite et le savant**

RENDEZ-VOUS

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

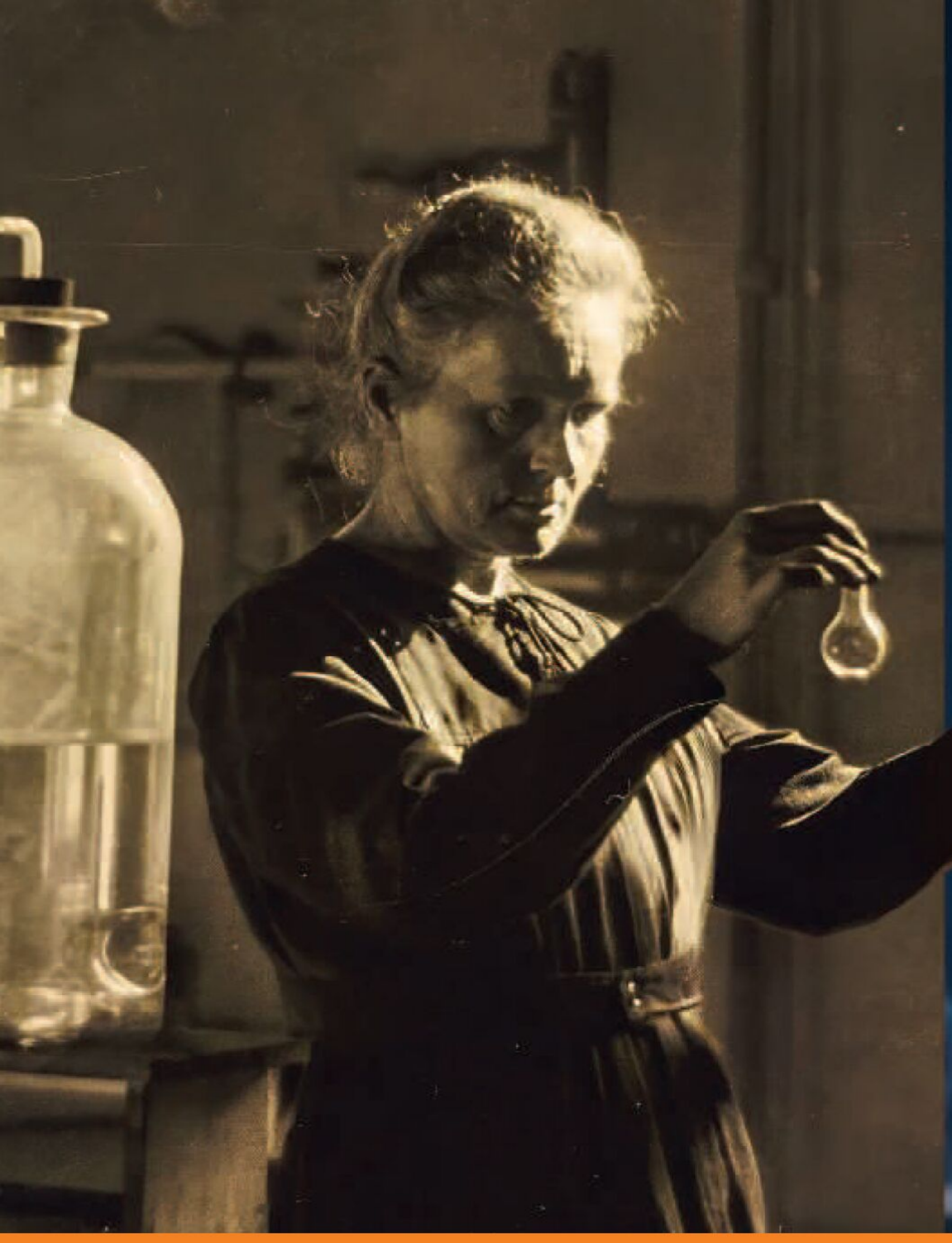
94 **Questions de lecteurs**

95 **Courrier**

96 **Le ciel de mars**

98 **À retrouver sur le Web**

SHUTTERSTOCK PHOTOMONTAGE SETA - GONZALO AZUMENDI/LAIF-REA - TEXAS A&M SCIENCE - MARK FELIX/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA - SPL/AKG



Conception : Agence Bastille / Crédits photos : Julie Cherki / Marie Curie : photo Wyndham Edr. Source : Musée Curie (coll. ACJC) – Photomontage : tographite.

TRANSMETTRE L'ESPOIR DE VAINCRE LE CANCER

LÉGUER TOUT OU PARTIE DE SES BIENS À L'INSTITUT CURIE, 1ER CENTRE FRANÇAIS DE RECHERCHE EN CANCÉROLOGIE, EST UN FORMIDABLE MESSAGE D'ESPOIR.

AGISSEZ AVEC NOS CHERCHEURS POUR LES GÉNÉRATIONS À VENIR.

institut Curie

LEGS – DONATION – ASSURANCE-VIE

curie.fr **Pour tout renseignement** Institut Curie - direction des relations donateurs : 26, rue d'Ulm - 75248 Paris CEDEX 05 - 01 56 24 55 34 - legs@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter et à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A 032026

Les enjeux du contrôle du Groenland

Pourquoi Donald Trump veut-il annexer le Groenland, ce territoire autonome danois ? L'île possède de nombreux atouts pour les États-Unis : des ressources minérales intéressantes pour les nouvelles technologies et l'accès à de nouvelles routes maritimes à la faveur de la fonte des glaces.

Par Sylvie Rouat

Lors du Forum économique à Davos (Suisse), en janvier, Donald Trump a une nouvelle fois exprimé son intention d'*« annexer »* le Groenland, un territoire autonome danois de 2,17 millions de km² recouvert à 85 % de glace. Pourquoi ? Parce que ses ressources géologiques et sa position géographique stratégique, selon les dires du président américain, intéressent les États-Unis, face aux appétits de la Russie et de la Chine. *« Selon des estimations, le Groenland abriterait 43 des 50 minerais critiques listés par l'US Geological Survey* [Institut d'études géologiques des États-Unis]. *Trump les a mentionnés à plusieurs reprises dans ses commentaires sur le Groenland »*, remarque Nick Bæk Heilmann, expert dans les affaires groenlandaises et arctiques au sein du cabinet de conseil international Kaya Partners, présent au Groenland.

Les richesses minérales de la plus grande île au monde attirent depuis longtemps les convoitises. À commencer par les Danois eux-mêmes, qui ont exploité dès 1854 et pendant plus d'un siècle la mine d'Ivittuut pour en extraire de la cryolite, utilisée dans la production indus-

trielle d'aluminium. Le flux de travailleurs danois a été un élément notable de la présence du royaume scandinave. Le documentaire *Greenland's White Gold* (*L'Or blanc du Groenland*) a mis en lumière le rôle économique qu'aurait joué cette mine pour l'économie danoise, lui permettant d'engranger l'équivalent de 54 milliards d'euros.

Outre la cryolite, le Groenland possède des ressources minérales intéressantes pour les nouvelles technologies, dont des éléments critiques pour la transition énergétique. On y trouve ainsi des gisements de terres rares parmi les plus importants du monde, mais aussi de graphite, de lithium ou encore de niobium, tantale, platine, etc. Auxquels s'ajoutent des gisements importants de zinc, plomb, cuivre, fer, titane, vanadium, tungstène, or et autres gemmes. Les gisements d'uranium, en revanche, ont vu leur exploitation interdite en 2021, pour des raisons environnementales et sociales, ce qui a gelé plusieurs projets.

D'où vient cette richesse ? « *Le territoire concentre une grande variété de lithologies, mais aussi des roches d'âges extrêmement différents,* explique Pierre Sans-Jofre, géologue au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. *Certaines se sont formées il y a seulement quelques dizaines de milliers d'années, d'autres remontent à 3,8 milliards d'années. C'est la seule île au monde où l'on peut parcourir autant de chapitres de l'histoire de la Terre. Les roches les plus anciennes se sont formées dans un environnement chimique radicalement différent de celui d'aujourd'hui.* » Avant environ 2 milliards d'années, l'atmosphère et les océans ne contenaient en effet pas de dioxygène. Des éléments comme le fer et le manganèse étaient alors dissous dans l'eau. Lorsque les premières bactéries photosynthétiques ont commencé à produire de l'oxygène, celui-ci a réagi avec les éléments dissous, provoquant leur oxydation et leur précipitation vers les fonds marins. Cette pluie ferrugineuse a formé d'épais dépôts sédimentaires riches en métaux. Ils constituent une large partie des gisements de fer exploités dans le monde. « *Au-delà du fer et du manganèse, les conditions chimiques de ces environnements anciens permettaient également d'accumuler de nombreux métaux traces dans les sédiments* », souligne Pierre Sans-Jofre. Ces métaux présents en faibles concentrations produiront notamment les gisements de terres rares au sud de l'île. L'épaisse calotte glacée du Groenland a ensuite protégé les gisements de l'érosion et de l'exploitation humaine pendant des temps géologiques.

PIERRE SANS-JOFRE

« C'est la seule île au monde où l'on peut parcourir autant de chapitres de l'histoire de la Terre »

Pierre Sans-Jofre, géologue au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

Le réchauffement rebat les cartes de l'extraction minière

Aujourd'hui, l'Arctique se réchauffe trois à quatre fois plus vite que le reste du monde et de nouveaux affleurements minéraux apparaissent. Pour Donald Trump, cela représente un nouvel eldorado. « *Il faut ici faire un peu de démystification,* souligne Nick Bæk Heilmann. *Le Groenland a effectivement des richesses minérales, mais comme beaucoup d'autres endroits et, jusque très récemment, les États-Unis n'y ont pas été très actifs dans l'exploration minière.* »

Pourtant, les gouvernements outre-Atlantique ont multiplié, ces dernières années,

GONZALO AZUMENDI/LAIF-REA

Avec ses 2,17 millions de km², la plus grande île du monde attire les convoitises étatiques et privées en raison de ses richesses minérales et de son emplacement stratégique.

les tentatives de réveiller l'intérêt du secteur privé américain pour le développement minier au Groenland. *« Je soutiens donc l'idée que les minerais ne sont pas le moteur principal de la quête américaine de contrôle et d'acquisition du Groenland,* insiste Nick Bæk Heilmann. *Pourquoi ? Parce que les gouvernements groenlandais successifs ont répété au cours des cinquante dernières années que le Groenland est ouvert aux affaires dans le secteur minier. Et il existe, dans sa population, une acceptabilité sociale générale de l'exploitation minière, ce qui est très important.* » Il n'est nul besoin d'acquérir le Groenland pour accéder à ses richesses quand ses politiques y voient une opportunité de s'affranchir de tout ou partie des subventions danoises. Il y a une décennie, plusieurs licences ont ainsi été attribuées à des entreprises chinoises, britanniques, australiennes. Mais il ne reste que deux seules mines en opération aujourd'hui. Les longs hivers arctiques, les infrastructures parcellaires, l'absence de routes ou d'électricité rendent difficile l'exploitation minière. Le gisement de Citronen, au nord de l'île, qui offre des réserves de 100 millions de tonnes de minerais, ne dispose ainsi pas de logistique d'acheminement vers un éventuel marché international ! Un tel projet nécessiterait un investissement de plusieurs milliards de dollars, alors que les métaux stratégiques se négocient sur un marché volatil et concurrentiel, la Chine, le Canada ou l'Australie exploitant déjà ces minerais à moindre coût.

Toutefois, les cartes sont rebattues par le réchauffement climatique, *« un moteur sous-jacent clé de la géopolitique arctique,* souligne Jakob Dreyer, chercheur en politique climatique et de sécurité à l'université de Copenhague, au Danemark. *À terme, cela va améliorer la rentabilité de l'extraction des ressources. Or, les États-Unis sont très préoccupés par les intérêts chinois et russes dans les marchés miniers liés à la transition verte. La position quasi dominante de la Chine en la matière est perçue comme une menace, notamment lorsqu'elle manifeste un intérêt pour le Groenland.* »

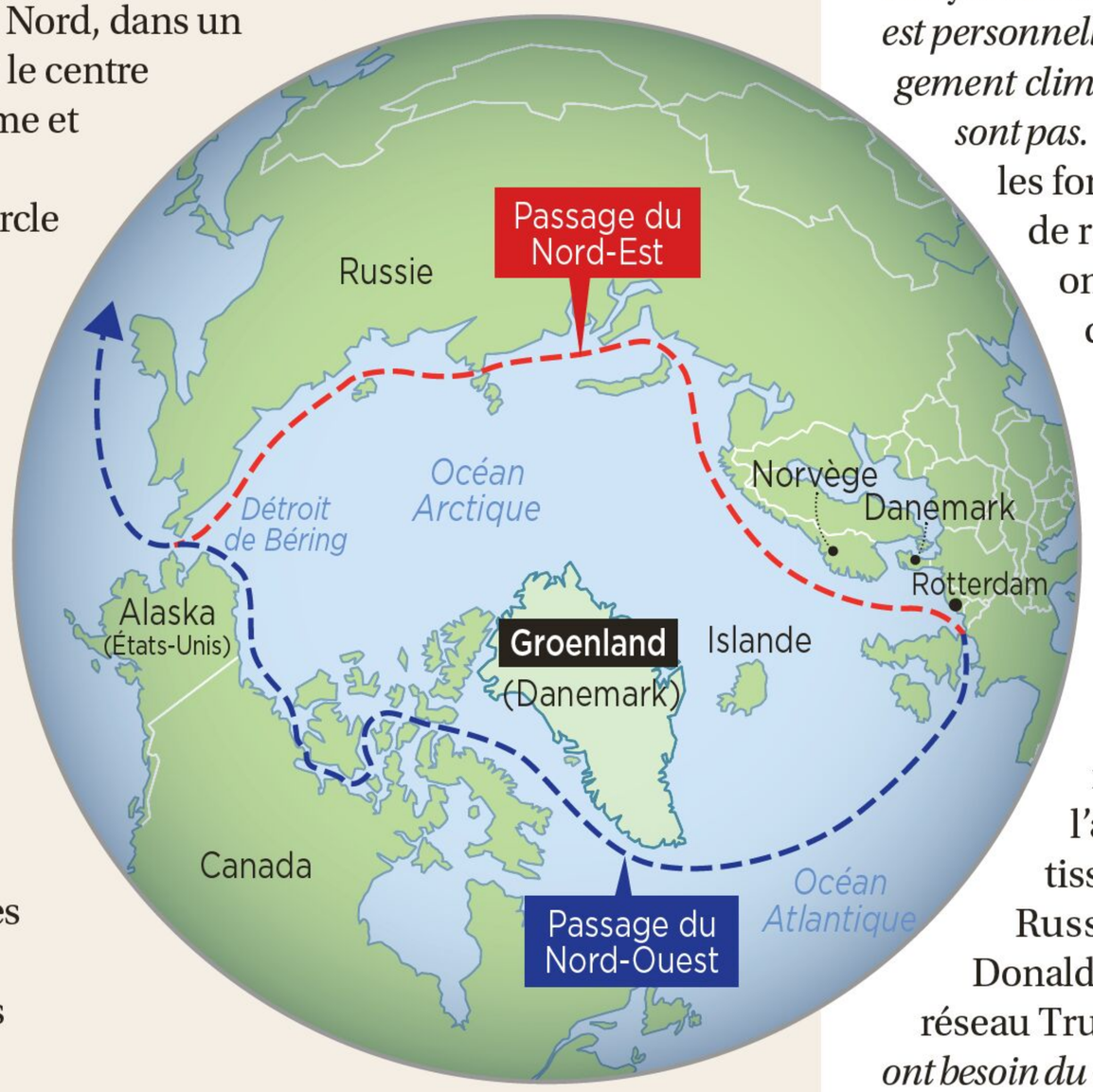
Un bouclier antimissile protégeant les États-Unis

Autre point essentiel pour comprendre l'intérêt des Américains : l'accès à de nouvelles routes maritimes à la faveur de la fonte des glaces. *« Cela renforce l'importance de l'Arctique comme frontière stratégique mondiale,* poursuit Jakob Dreyer. *Donc, même si Donald Trump est personnellement ambigu sur le changement climatique, ses conseillers ne le sont pas.* » Selon le chercheur danois, les forces armées et les services de renseignement américains ont déjà mené, pendant des décennies, des analyses de l'impact du changement climatique dans l'Arctique. Plus largement, il y a un intérêt croissant des grandes puissances pour la région boréale, un intérêt motivé par les attentes liées au changement climatique, et plus encore par l'augmentation des investissements militaires que les Russes y font. Le 14 janvier, Donald Trump a ainsi écrit sur son réseau Truth Social : *« Les États-Unis ont besoin du Groenland. Il est vital pour le Golden Dome que nous construisons.* » Ce

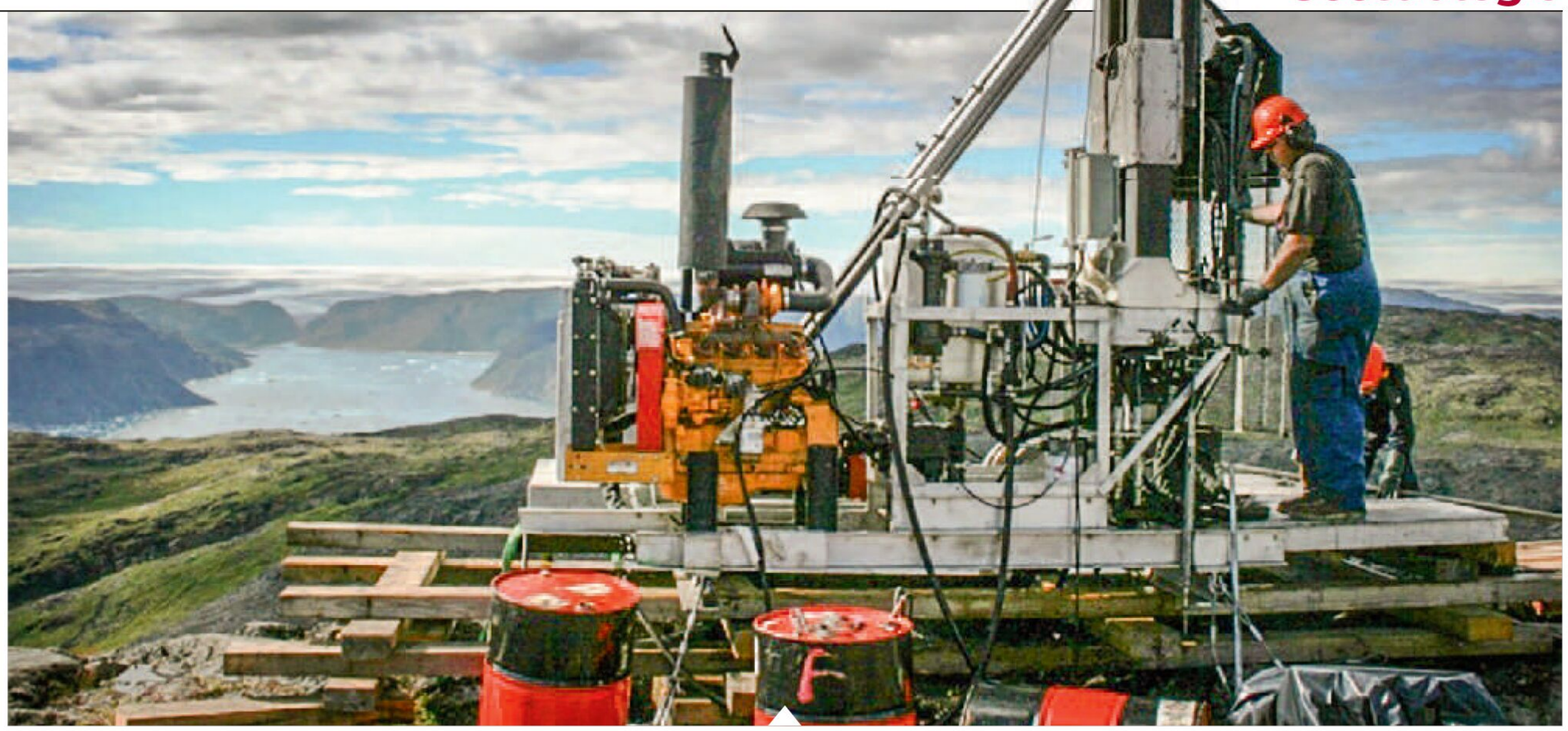
NAVIGATION

Une position cruciale pour les futures routes maritimes

Posté entre l'Amérique du Nord et l'Europe, le Groenland pourrait devenir le point de contrôle des routes maritimes que sont les passages du Nord-Est et du Nord-Ouest, à chaque été plus libres de glaces : dans ce contexte, qui contrôle le Groenland contrôle une porte d'entrée vers l'Arctique et le pôle Nord, dans un futur où cette région deviendrait le centre névralgique du transport maritime et énergétique. Les trajectoires de navigation situées au nord du cercle polaire vont en effet permettre bientôt de rallier l'Atlantique, le Pacifique et l'Europe plus rapidement que par les voies classiques, en réduisant les trajets de 30 à 40 %. Le maître du Groenland serait ainsi à même de superviser le trafic, de sécuriser ces routes pour le commerce et la défense et d'établir des bases pour le ravitaillement des navires, à l'heure où les compagnies de transport et les marines militaires inscrivent dans leur cahier de commande des navires capables d'exploiter ces routes.



BRUNO BOURGEOIS



GREENLAND MINERALS

Kuannersiut, au sud de l'île, est l'une des plus importantes réserves minières au monde. Ici, un projet d'exploitation de terres rares et d'uranium d'une société australienne a été abandonné faute d'avoir obtenu une licence en 2021.

« Dôme d'or » n'est pour l'instant qu'une formule politique pour désigner l'idée d'un bouclier antimissile protégeant les États-Unis. Un tel système détecterait les missiles ennemis et les intercepterait avant qu'ils n'atteignent le sol américain. *« Là encore, les États-Unis n'ont pas besoin d'acquérir le Groenland pour sécuriser l'Arctique,* insiste Nick Bæk Heilmann. *Il existe un accord de défense datant de 1951, qui leur donne une liberté d'action pour opérer au Groenland.* » Dès la Seconde Guerre mondiale, alors que le Danemark était occupé par les nazis, les États-Unis avaient été autorisés à instaurer une présence militaire américaine au Groenland pour éviter que l'Allemagne n'en prenne le contrôle. À la fin des hostilités, le gouvernement Truman avait offert 100 millions de dollars en or au Danemark en échange de la souveraineté complète sur la grande île, déjà perçue comme le maillon central de la défense de l'Amérique du Nord face à l'URSS. La proposition fut rejetée, mais les années de guerre froide qui ont suivi ont été l'âge d'or des bases américaines dans la région. Construite en 1951 au nord du cercle polaire, la base aérienne de Thulé (devenue base spatiale de Pituffik en 2023) a accueilli à son apogée plus de 10 000 soldats. Et dans les années 1960, les Américains sont allés jusqu'à creuser une vaste base sous la calotte glaciaire, où travaillaient quelque 200 personnes en vue d'y dissimuler 600 missiles nucléaires, projet ensuite abandonné. *« Pendant cette période, il y avait sur ce territoire environ 20 bases militaires américaines, petites et grandes,* note Nick Bæk Heilmann, *et cela pourrait encore se faire.* » La sécurité de l'Arctique pourrait ainsi s'organiser dans le cadre politique et constitutionnel actuel.

L'ambition territoriale de Trump inquiète l'Europe

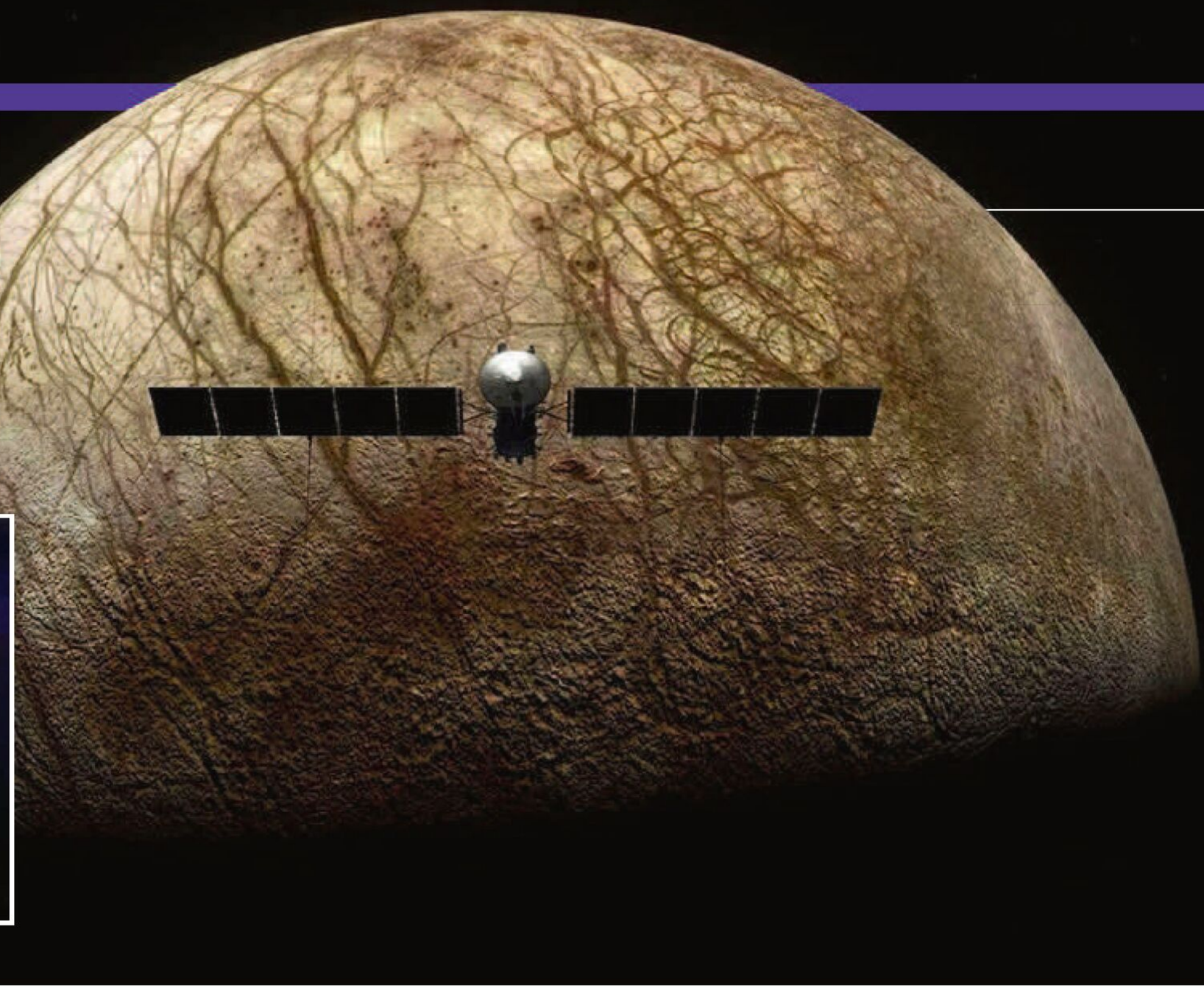
Reste un dernier motif, plus inquiétant : l'expansion du territoire américain, une ambition présente dès le discours d'investiture de Trump. *« Je suis de plus en plus convaincu, comme beaucoup d'autres analystes, que la conquête de nouveaux territoires est le moteur principal des ambitions de Trump* », explique Nick Bæk Heilmann. Pour Julian Popov, ancien ministre de l'Environnement de Bulgarie et membre du Conseil européen des relations étrangères, *« nous sommes aujourd'hui témoins d'une forme lourde de politique de la nostalgie. Nous connaissons déjà ce* "Make America great again" *lancé par Donald Trump. Mais cette injonction existe aussi en Russie et en Chine ! Il faut se rappeler que cette dernière représentait, dans un passé récent, un tiers de l'économie mondiale. L'objectif non déclaré de Pékin est d'y revenir. Mais la compétition pour cette place est intense.* » Et l'Amérique de Donald Trump y déploie toutes ses armes. ■

KAYA PARTNERS

NICK BÆK HEILMANN Expert dans les affaires groenlandaises et arctiques au sein du cabinet de conseil Kaya Partners

Un espace sans régulation dédié à la tech

« Nous pensons fortement qu'il existe un réseau de milliardaires de la tech, dans des cercles liés aux cryptomonnaies et aux nouvelles technologies, pour qui le Groenland est une sorte d'espace à "terraformer", soit un espace de marché libre, sans régulation, permettant de tester des technologies qui n'existent pas encore. Les vastes ressources hydroélectriques inexploitées du Groenland pourraient ainsi servir à alimenter l'IA, le minage de cryptomonnaies, etc. Tout cela est encore très spéculatif. »



La sonde Europa Clipper, qui survolera Europe à partir de 2030, pourra permettre de confirmer la composition interne de l'astre (ici vu en coupe).

NASA/JPL-CALTECH

Une vie possible dans l'ombre radioactive d'Europe

Des chercheurs ont démontré qu'une vie microbienne pourrait s'épanouir dans l'océan souterrain de cette lune de Jupiter grâce à l'énergie fournie par des éléments radioactifs.

La plus grosse lune de Jupiter fascine les scientifiques depuis des décennies. Sous sa croûte de glace, Europe recèle en effet un gigantesque réservoir d'eau liquide et salée deux fois plus volumineux que la totalité des océans terrestres — idéal, potentiellement, pour abriter la vie. Des mesures réalisées en 2024 par la sonde américaine Juno ont cependant douché cet espoir. Elles indiquent que l'enveloppe glacée est bien plus épaisse que prévu (jusqu'à 35 kilomètres) ; la chaleur interne d'Europe susceptible d'alimenter une forme de vie étant de ce fait considérablement amoindrie. Cette lune serait-elle donc, tout compte fait, un astre « mort » ? Certainement pas, estiment des planétologues du centre de vol spatial Goddard de la Nasa. Ils viennent de montrer, lors du congrès de l'Union américaine de géophysique, qu'une vie microbienne pourrait s'épanouir dans l'océan souterrain d'Europe… grâce à l'énergie fournie par des éléments radioactifs !

Des espèces chimiques très réactives

Les chercheurs ont tout d'abord estimé la quantité d'isotopes radioactifs — uranium 235, uranium 238 et potassium 40 — présents dans les roches d'Europe en exploitant les données terrestres, ainsi qu'une variété d'observations sur les lunes du Système solaire. Ces roches sont en contact avec le fond de l'océan. Elles libèrent ainsi, par dissolution dans l'eau liquide, des éléments radioactifs qui, en se désintégrant peu à peu sur de longues périodes (la demi-vie du potassium 40 est de 1,2 milliard d'années), décomposent les molécules d'eau en ions oxygène et hydrogène. Or, ces espèces chimiques, très réactives, pourraient servir à alimenter un métabolisme microbien, même en l'absence totale de lumière, comme on l'observe sur Terre dans les fonds océaniques profonds. Selon les calculs des planétologues, cette source d'énergie pourrait produire dans l'océan d'Europe une biomasse de plusieurs millions de milliards de milliards de cellules… l'équivalent de milliers de baleines bleues !

Leur théorie pourra être testée dans les années qui viennent, certains paramètres tout du moins. « *La désintégration radioactive du potassium 40 engendre en effet différents isotopes, dont le calcium 40* », précisent les auteurs. Un élément que la mission de la Nasa Europa Clipper, lancée en 2024, sera capable de détecter lorsqu'elle effectuera une quarantaine de survols d'Europe au début des années 2030. Mais « *ce n'est pas uniquement sur Europe qu'un tel mécanisme pourrait fonctionner* », anticipent les chercheurs. Il pourrait ensemencer « *d'autres lunes-océans du Système solaire comme Ganymède, Jupiter, Titan ou les satellites d'Uranus* ». ■ **F. D.**

Un métal rendu insubmersible

Gravé au laser, un aluminium superhydrophobe piège durablement l'air. Ce matériau pourrait conduire à la conception de navires insubmersibles.

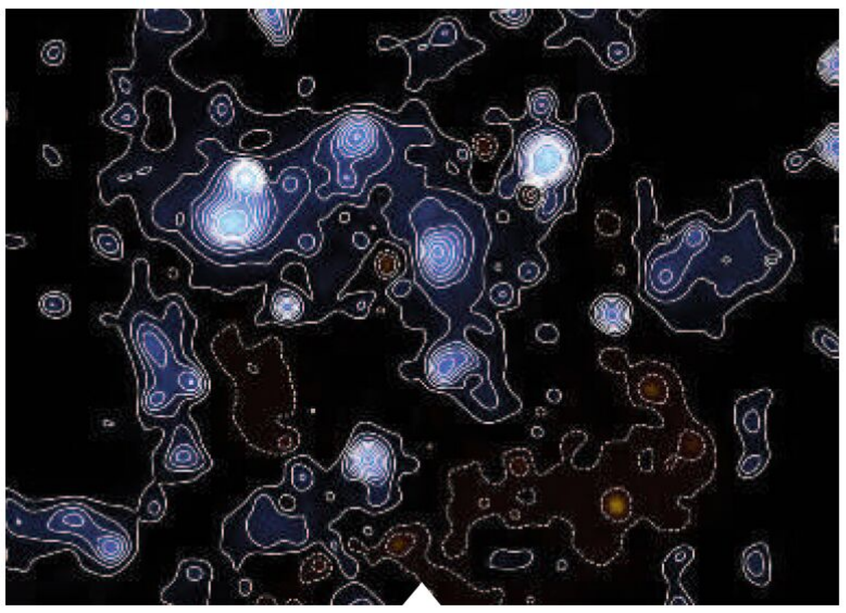
J. ADAM FENSTER / UNIVERSITY OF ROCHESTER

Même percé de plusieurs trous, le tube métallique continue de flotter.

S'inspirant des argyronètes, ces araignées aquatiques qui vivent sous l'eau dans une sorte de cloche de plongée tissée qui emprisonne l'air, des chercheurs de l'université de Rochester (États-Unis) ont créé un matériau superhydrophobe. Pour cela, ils ont gravé par impulsions laser l'intérieur de tubes en aluminium de micro- et nanocavités complexes qui, lorsque le tube est plongé dans l'eau, emprisonnent une bulle d'air stable. Cela l'empêche de se gorger d'eau et de couler. Le procédé a été démontré en 2019 pour des disques, mais ceux-ci pouvaient perdre leur capacité de flottaison lorsqu'ils étaient fortement inclinés. Les tubes, en revanche, pourraient résister aux conditions de mers extrêmes, après des tests dans des environnements très rudes, y compris en les perçant de plusieurs gros trous. Cette recherche ravive l'espoir de créer un jour un navire insubmersible. ■ **S. R.**

EN DEUX MOTS

ASTRONOMIE Dans les archives du télescope spatial Kepler, une exoplanète semblable à la Terre a été découverte, mais en version glacée (avec une température moyenne de -68 °C). **LUNE** Un réacteur nucléaire compact de 40 kilowatts sera déposé sur la Lune d'ici à 2030, ont annoncé la Nasa et le département américain de l'Énergie. **MARS** Des deltas repérés sur la planète Rouge ont permis d'estimer à 1 km la profondeur de l'océan qui recouvrait l'hémisphère nord il y a 3 milliards d'années.



DR. GAVIN LEROY/COSMOS-WEBB COLLABORATION

La nouvelle carte de la matière noire (en bleu).

Au plus près de la matière noire

ASTRONOMIE Grâce au télescope spatial James-Webb (JWST), les astronomes ont dressé une carte de la matière noire deux fois plus précise que celle de Hubble (2007). Cette matière n'émet aucun rayonnement, mais sa masse trahit sa présence en déformant le trajet de la lumière des 800 000 galaxies lointaines observées par le JWST. Sa répartition influence celle de la matière ordinaire, dessinant ainsi l'ossature de l'Univers. **F. N.**

SOURCE : DIANA SCOGNAMIGLIO, CALTECH, ÉTATS-UNIS.

7000

Le nombre d'atomes du plus gros système quantique

PHYSIQUE Le plus gros système en état de superposition quantique consiste en des nanoparticules de plus de 7000 atomes de sodium se comportant à la fois comme des objets ponctuels et des ondes. Elles existent simultanément dans un ensemble de configurations possibles. **F. D.**

SOURCE : S. PEDALINO, UNIVERSITÉ DE VIENNE, AUTRICHE.

Des robots plus petits qu'un grain de sel

ROBOTIQUE Des chercheurs américains ont conçu les plus petits robots autonomes programmables jamais réalisés, mesurant à peine 200 micromètres sur 300, moins qu'un grain de sel. Ces micromachines alimentées par la lumière intègrent calcul, capteurs et propulsion. Capables d'évoluer à l'air libre ou en milieu liquide, ces dispositifs pourraient servir à la microchirurgie, à la surveillance cellulaire ou à des applications industrielles pour la fabrication de dispositifs miniaturisés. **N. G. C.**

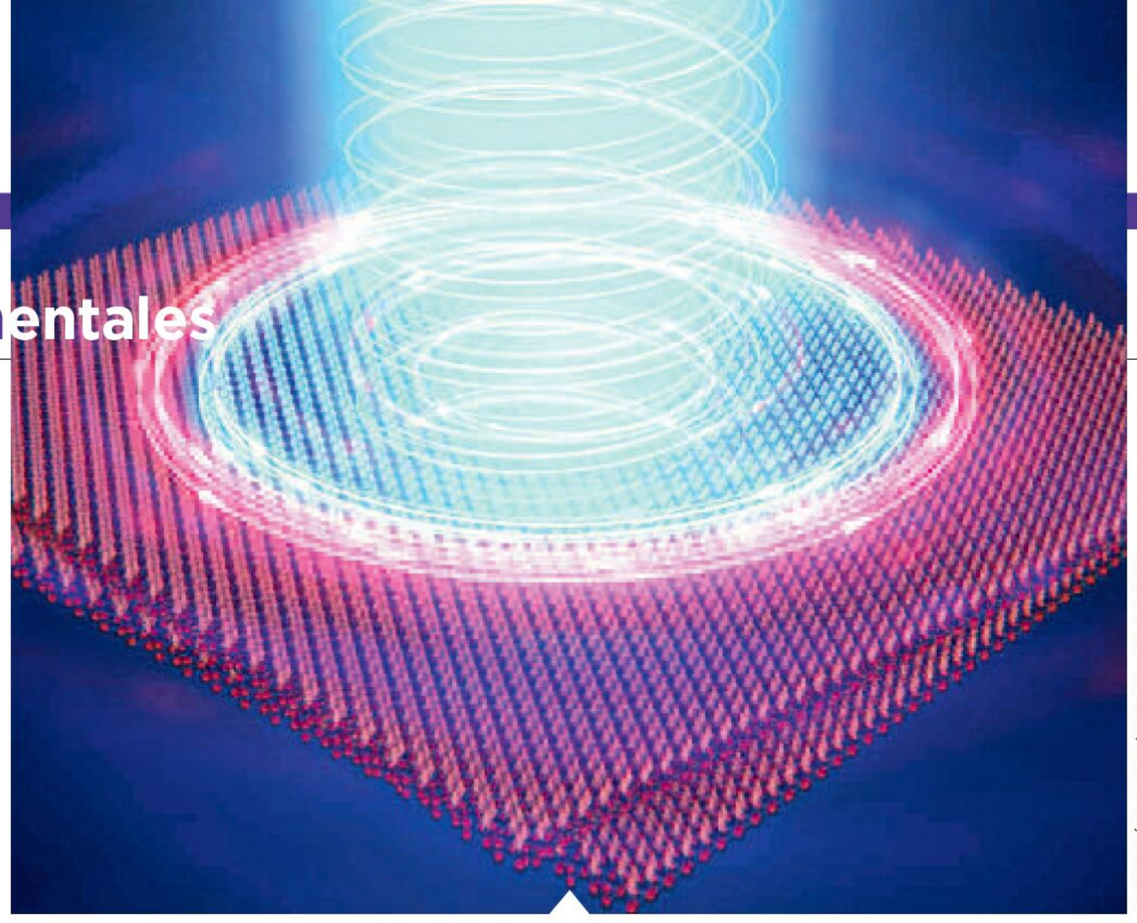
MARC MISKIN, UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA

Chaque micromachine mesure environ 200 × 300 × 50 micromètres.

SOURCE : MAYA LASSITER, UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS.

1300 trésors de Hubble exhumés

ASTRONOMIE 417 fusions de galaxies, 86 lentilles gravitationnelles potentielles et 18 galaxies « méduses » : voilà quelques-uns des 1300 objets dignes d'intérêt découverts par deux astronomes de l'ESA. Pour y parvenir, ils ont confié à une intelligence artificielle l'analyse de 100 millions d'images issues des archives de Hubble. L'algorithme a exhumé ces objets jusqu'alors ignorés en 2-3 jours. **F. N.**



E. SAHAGÚN, SCIXEL/UNIVERSITY OF BASEL

Pour inverser la polarité de l'aimant, les chercheurs ont utilisé un laser (en bleu) sur un matériau ferromagnétique (en rouge) (illustration).

La polarité d'un aimant renversée au laser

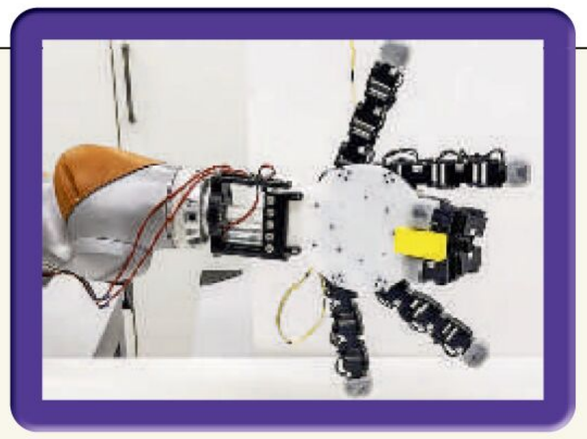
PHYSIQUE Des physiciens ont réussi à inverser la polarité d'un aimant à l'aide d'un laser ultrarapide, une prouesse inédite qui pourrait transformer l'électronique du futur. En quelques femtosecondes (10^{-15} s), sans champ magnétique externe, l'impulsion lumineuse renverse l'orientation des spins, ces minuscules aimants internes au matériau. À la clé : des mémoires et composants potentiellement plus rapides et moins énergivores, pilotés directement par la lumière. **J. B.**

SOURCE : OLIVIER HUBER, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE ZURICH, SUISSE.

IL A DIT

« À ceux qui ne sont pas au courant : SpaceX a déjà réorienté sa stratégie vers la construction d'une ville autonome sur la Lune »

Elon Musk a annoncé une révision de la feuille de route spatiale de sa société SpaceX, dont la priorité ne serait plus Mars mais l'établissement d'une base lunaire.



LASA/CREATE/EPFL

À VOIR SUR LE NET

Une main robotique plus habile que la nôtre

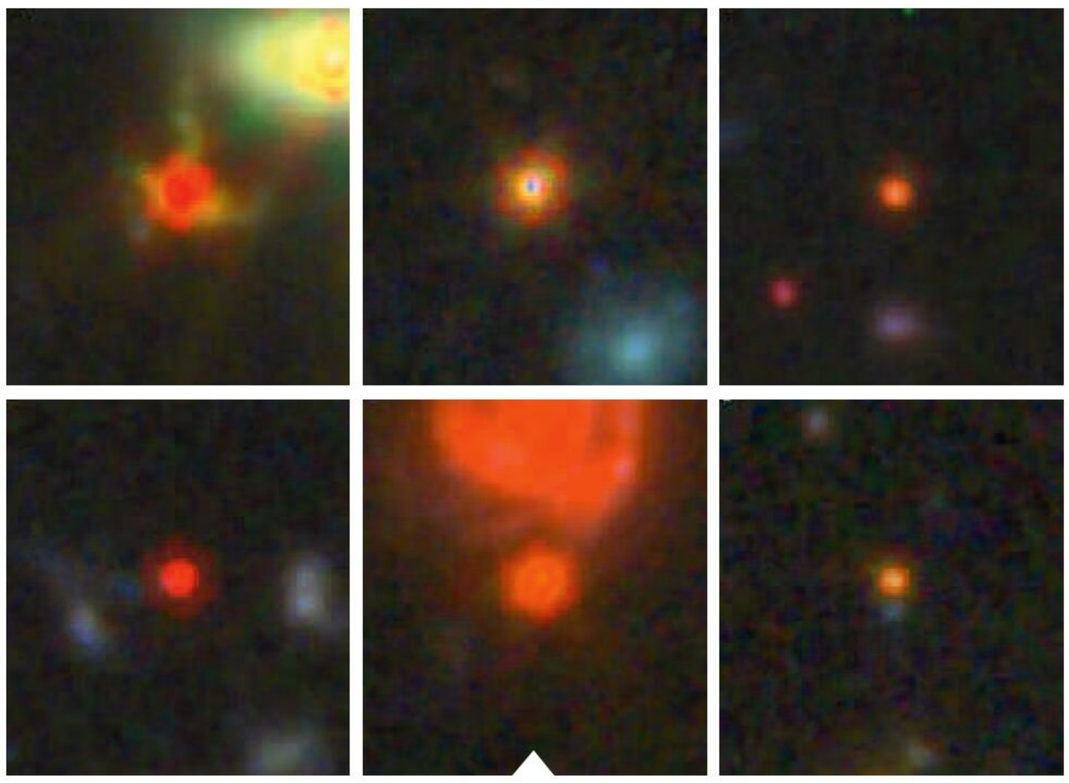
INGÉNIERIE Attraper une carte, faire tournoyer un stylo, manipuler des objets fragiles… Cette nouvelle main robotique accomplit ces gestes avec une agilité qui dépasse celle d'une main humaine. Dotée de capteurs précis et pilotée par des algorithmes d'apprentissage, elle ajuste en temps réel force et coordination. La vidéo de démonstration, impressionnante, montre cette prouesse en action. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Ces points rouges seraient des trous noirs

Il s'agirait de jeunes trous noirs enveloppés dans un cocon de gaz ionisé extrêmement dense.

L'origine des étranges petits points rouges (*little red dots*) observés par le télescope spatial James-Webb depuis 2024 dans les galaxies les plus jeunes de l'Univers est peut-être enfin élucidée. Selon une étude parue dans la revue *Nature*, il s'agirait de jeunes trous noirs enveloppés dans un cocon de gaz ionisé extrêmement dense. Dans un premier temps, les astrophysiciens avaient envisagé des trous noirs supermassifs en pleine ripaille de gaz. Mais, contrairement aux trous noirs actifs connus, les *little red dots* produisent très peu de rayons X et quasiment pas d'ondes radio. Une nouvelle hypothèse suggère qu'il s'agit bien de trous noirs, mais très jeunes et jusqu'à 100 fois moins massifs qu'estimé initialement. Le cocon de gaz qui les enrobe étoufferait les signatures habituelles en rayons X et en radio. Si cette interprétation se confirme, les petits points rouges correspondraient à une phase clé, jusqu'ici méconnue, de la croissance des trous noirs dans l'Univers jeune. **F. N.**



NASA/ESA/CSA/WEBB/RUSAKOV ET AL

Les « little red dots » (petits points rouges) révélés par le télescope spatial James-Webb seraient des trous noirs en gestation.

CHERBOURG, LÀ OÙ COMMENCENT LES HISTOIRES.

LA CITÉ DE LA MER

TITANIC

LE REDOUTABLE

citedelamer.com

LA CITÉ DE LA MER
CHERBOURG

leCotentin

Création : agence ÅSGARD Illustration : Flore Maquin

Les oursins ont disparu des îles Canaries

ÉCHINOLOGIE Les oursins du genre *Diadema* ont déserté les îles Canaries (Espagne). Les chercheurs n'ont en effet trouvé aucune trace de larves dans les zones de vie de l'espèce depuis 2022, ce qui implique l'absence de reproducteurs. C'est le premier cas de disparition locale totale constaté par le consortium international qui suit la diffusion d'un virus pathogène identifié en 2022 et qui touche tous les habitats des oursins dans l'ensemble des mers du globe. **L. C.**

SOURCE : IVÁN CANO, UNIVERSITÉ DE LA LAGUNA, ESPAGNE.

S. HANQUET/ NATUREL/ EBPHOTO

« *Diadema africanum* » a subi une mortalité massive.

2,3 MILLIONS DE TONNES
Le bilan carbone des JO d'hiver

CLIMATOLOGIE Les jeux Olympiques qui se sont tenus à Milan-Cortina (Italie) du 6 au 22 février auront émis en tout 2,3 millions de tonnes de gaz à effet de serre. Un bilan en progrès pour des JO d'hiver, mais suffisant pour faire disparaître 5,5 km² de surface neigeuse selon un ratio calculé par l'organisation Scientists for global responsibility, qui met le doigt sur le paradoxe d'une activité qui fait fondre son terrain de jeu. **L. C.**

JON AARS / NORWEGIAN POLAR INSTITUTE

La population locale de ces animaux est en croissance après l'interdiction de leur chasse en 1973.

Les ours polaires du Svalbard vont bien

Contrairement à ceux vivant au Groenland et en Alaska, les ours de l'archipel norvégien sont en excellente condition physique.

Si la population mondiale des ours polaires est globalement stable depuis les années 2000 (environ 26 000 individus), la fonte des glaces s'accompagne souvent d'une perte de poids des ursidés, voire d'un déclin démographique dans certaines régions arctiques. C'est le cas dans la mer de Beaufort (nord de l'Alaska et du Canada) ou encore dans la baie d'Hudson (nord du Canada). Convaincus de trouver des résultats similaires autour de l'archipel du Svalbard (Norvège), des chercheurs de l'Institut polaire norvégien ont évalué la condition physique d'*Ursus maritimus* au cours d'une période de fonte rapide de la glace. Dans leur étude, publiée dans *Scientific Reports*, les biologistes ont analysé des relevés de corpulence (longueur du corps, périmètre du tronc, masse corporelle) effectués entre 1995 et 2019. *« Nous avons été très surpris de constater leur bonne santé !* relève Jon Aars, premier auteur de ces travaux. *L'analyse a montré le contraire de ce que l'on pensait : les ours arrivent à stocker d'importantes réserves de graisse au printemps et sont en meilleure condition physique aujourd'hui qu'auparavant.* »

L'espèce reste classée comme vulnérable

Comment expliquer cette exception ? Après un siècle de chasse intensive, l'interdiction instaurée sur le territoire norvégien en 1973 a entraîné une croissance des populations locales. Celles-ci demeurent cependant inférieures à la capacité d'accueil du milieu (capacité de charge), limitant ainsi la concurrence alimentaire et favorisant la survie. En parallèle, la fonte de la banquise semble entraîner une concentration des proies, comme le phoque annelé, sur des zones de glace plus restreintes, ce qui pourrait faciliter la chasse par l'ours polaire. Une diversification alimentaire a également été observée, puisque des ours ont été aperçus en train de se nourrir de carcasses de baleines, d'œufs de canards eiders à duvet et de phoques barbus. *« Nous pourrions toutefois observer un point de basculement lorsque la population atteindra la capacité de charge — qui diminue avec la disparition de l'habitat »*, prévient Jon Aars. L'espèce reste à ce jour classée comme vulnérable. ■ **T. de B.**

GUILLAUME LE PROVOST / IFREMER

Un des deux prototypes Argo Deep-6000, en janvier au nord des Antilles.

Prendre le pouls des abysses

OCÉANOGRAPHIE Deux nouveaux prototypes de flotteurs Argo ont plongé pour la première fois jusqu'à 6000 mètres de profondeur dans une fosse océanique des Antilles. Ils vont réaliser pendant sept ans des cycles de dix jours de plongée avant de transmettre leurs données par satellite. Conçus par l'Ifremer, ces profileurs Argo Deep-6000 permettront de mesurer en temps réel les effets du réchauffement global dans les abysses. 30 bouées grands fonds rejoindront d'ici à 2028 la flotte de 4000 profileurs pour couvrir plus de 98 % du volume de l'océan. **S. R.**

ELLE A DIT

« On a souvent dit que les chevaux peuvent sentir notre peur. Eh bien ! c'est vrai, et au premier sens du terme »

Léa Lansade, directrice de recherche à l'Inrae, coauteure d'une étude expérimentale consistant à présenter à des chevaux des cotons-tiges imprégnés de l'odeur de transpiration de volontaires regardant des films d'horreur.

SPANISH NATIONAL RESEARCH COUNCIL (CSIC)

Malgré l'absence de système nerveux, l'espèce « Pseudodiploria strigosa » jouit d'un sommeil réparateur durant la nuit.

Les coraux dorment aussi

CNIDARIOLOGIE Une équipe internationale de biologistes a montré que les coraux dorment, du moins ceux de l'espèce *Pseudodiploria strigosa* vivant sur les massifs de Curaçao (Caraïbes). Toutes les six heures, les chercheurs ont mesuré l'activité oxydative découlant de l'utilisation par le corail des sucres produits par la photosynthèse. Et constaté un repos la nuit selon le même rythme circadien que celui des animaux. **L. C.**

SOURCE : BRADLEY ALLEN WEILER, UNIVERSITÉ DE MIAMI, ÉTATS-UNIS.

Des tomates qui orchestrent leur défense

Un plant peut alerter ses voisins des attaques virales par un insecte infecté.

Certaines variétés de tomates sont capables d'alerter les plants voisins lorsqu'elles sont attaquées par des aleurodes (mouches blanches) infectés par des virus, selon une étude menée par l'université de Hangzhou (Chine). Si l'insecte est porteur de virus, la plante émet rapidement du bêta-caryophyllène, un signal volatil qui prépare ses voisines à déclencher une réponse antivirale accrue. Cette mobilisation limite fortement la propagation du pathogène et permet de préserver la production de graines. Les expériences ont montré que le signal n'était pas émis si l'aleurode n'était pas infecté. Dans ce cas, la plante se défend néanmoins indirectement en émettant un autre composé, encore non identifié, qui attire une guêpe parasitoïde prédatrice des aleurodes. Toutes les variétés ne possèdent pas cette stratégie, mais les auteurs suggèrent qu'elle pourrait être diffusée par croisements avec les lignées résistantes identifiées. *« Ce travail représente une avancée majeure,* commente la spécialiste Véronique Brault, de l'Inrae, *en démontrant qu'il est possible d'obtenir des plantes qui résisteront aux insectes vecteurs en attirant leur prédateur. »* **P. K.**

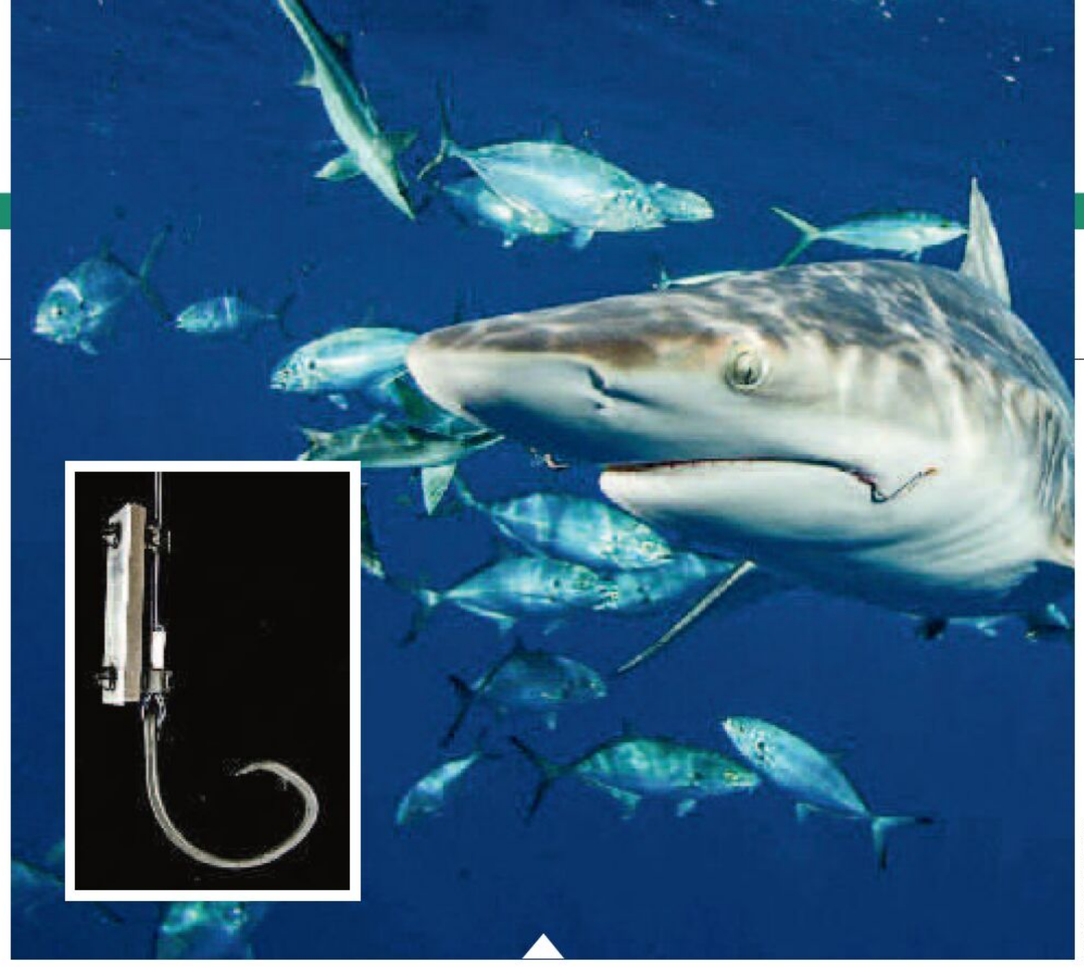
D. BRINGARD / BIOSPHOTO

Lors d'une attaque par un insecte porteur d'un virus, la plante libère des molécules, déclenchant une réponse antivirale de ses voisines.

La faille cachée derrière le tsunami japonais

GÉOLOGIE En 2011, un séisme de magnitude 9,1 a provoqué un tsunami exceptionnel dans l'océan Pacifique. Selon une étude internationale publiée dans *Science*, cela s'explique par la présence, dans la fosse du Japon, d'une mince couche d'argile localisée entre deux formations plus rigides. Cette configuration a entraîné un glissement de 50 à 70 mètres, déplaçant de vastes portions du plancher océanique. Cette couche, qui s'étend sur des centaines de kilomètres, rendrait la région plus vulnérable aux tsunamis. **S. R.**

SOURCE : J. D. KIRKPATRICK, UNIVERSITÉ DU NEVADA, ÉTATS-UNIS.



S.KAJIURA, FAU

L'appareil (médaillon) utilise du zinc et du graphite pour créer un champ électrique qui repousse les requins sans affecter les poissons ciblés.

Cet hameçon électrique sauve les requins

Un dispositif de dissuasion électrochimique permet d'éloigner les squales des lignes de pêche.

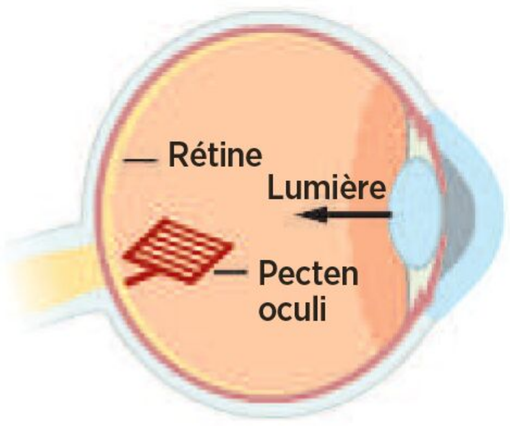
Chaque année, quelque 50 millions de requins sont capturés accidentellement, notamment avec la pêche à la palangre ciblant le thon et l'espadon. Cette menace majeure pour les populations de requins constitue aussi une perte économique pour les pêcheries. Si certaines modifications des engins permettent de réduire ces prises accessoires, elles diminuent souvent aussi les captures d'espèces de valeur. Des chercheurs de l'université de Floride (États-Unis) ont mis au point un nouveau dispositif de dissuasion qui pourrait lever ce compromis. En associant du zinc et du graphite dans l'eau de mer, la technologie génère un faible champ électrique, détectable par les requins, qui les éloigne des hameçons sans perturber les poissons ciblés. Testé en conditions réelles, le dispositif a réduit les captures de requins côtiers de 62 à 70 %. Mieux encore, les prises de poissons d'intérêt commercial ne diminuent pas — elles pourraient même être légèrement supérieures avec les hameçons traités. **S. R.**

Le paradoxe biologique de la rétine des oiseaux

ORNITHOLOGIE Contrairement aux autres vertébrés, la rétine des oiseaux est dépourvue de vaisseaux sanguins et ne peut donc pas être alimentée en oxygène. Un paradoxe pour cet organe très énergivore, que des chercheurs ont expliqué en identifiant le rôle du *pecten oculi*. Cette structure en accordéon plongée dans le fluide vitreux fournit à la rétine du glucose transformé en énergie par un métabolisme anaérobie. Cette particularité explique l'excellente acuité visuelle des oiseaux, dont la rétine n'est pas encombrée par un réseau veineux. **H. R.**

SOURCE : C. DAMSGAARD, UNIVERSITÉ D'AARHUS, DANEMARK.

A.MITSEVA/NATURE



Dépourvue de vaisseaux sanguins et donc d'oxygène, la rétine est alimentée en énergie par le « pecten oculi ».

L'énergie solaire captée par des nanosphères d'or

TECHNOLOGIE Les panneaux solaires pourraient faire un bond en efficacité. Une équipe a en effet mis au point des nanostructures en or, appelées « supraballs », capables d'absorber plus de 90 % du spectre solaire. Constituées de centaines de nanoparticules, ces sphères piègent efficacement la lumière. Testées sous forme de film sur un générateur thermoélectrique commercial, elles ont presque doublé l'absorption d'énergie solaire par rapport à un revêtement classique. **F. N.**

SOURCE : KYUNG HUN RHO, UNIVERSITÉ DE CORÉE, CORÉE DU SUD.

+100 %

L'augmentation de la biomasse de poissons dans le Yangzi Jiang

BIODIVERSITÉ Cinq ans après l'interdiction totale de la pêche commerciale dans le plus grand des fleuves chinois, le Yangzi Jiang, la biomasse de poissons a plus que doublé entre 2018 et 2023, montre une étude. La diversité d'espèces progresse aussi (+13 %), avec des signes encourageants pour des espèces menacées comme le marsouin du Yangzi Jiang. **H. J.**

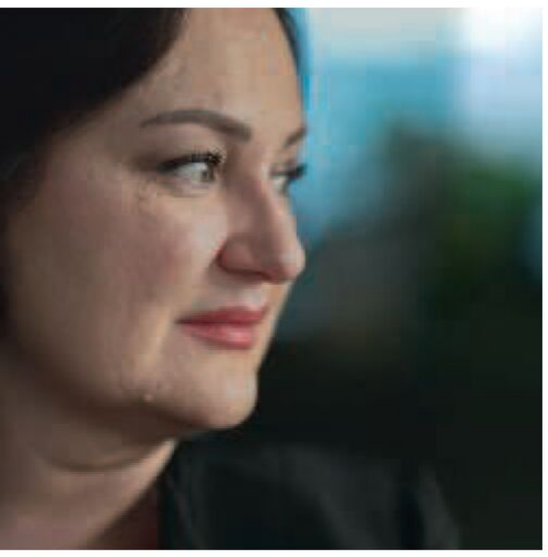
SOURCE : SÉBASTIEN BROSSE, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, FRANCE.

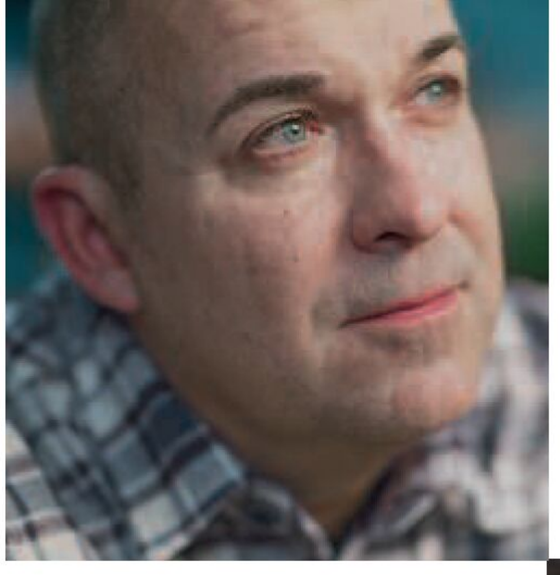
Une méthode pour mieux prédire les glissements de terrain

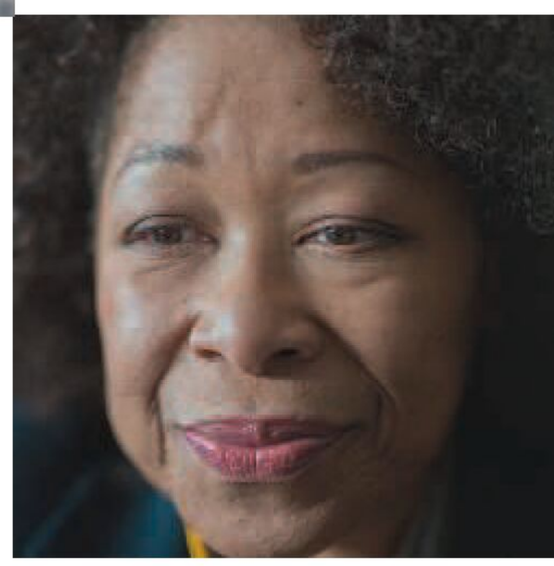
GÉOLOGIE Une équipe brésilienne a mis au point une méthode statistique pour mieux cerner les zones exposées aux glissements de terrain après de fortes pluies. En croisant 16 paramètres — pente, nature des sols, couverture végétale, proximité des rivières ou des routes, etc. —, les chercheurs ont obtenu des cartes plus fidèles aux secteurs effectivement touchés lors des pluies extrêmes de février 2023 à São Sebastião (Brésil, *photo*), où des dizaines de personnes avaient péri. **H. J.**

SOURCE : MARCOS SANTOS, ÉCOLE DU GÉNIE MILITAIRE, BRÉSIL.

NELSON ALMEIDA / AFP







POURQUOI CERTAINES PERSONNES AIMENT LES LUNDIS ?

Christine dirait que son travail l'a aidée à chasser les idées noires. Qu'elle y a trouvé la force d'affronter le cancer, tout en préservant quelque chose d'essentiel pour elle : une forme de normalité.

Pour Jim aussi, continuer à travailler a compté. Cela l'a aidé à garder un rythme, un quotidien. À continuer à voir la vie au-delà de la maladie. Et surtout, à rester Jim.

Au travail, Eva a trouvé le soutien de son équipe sans avoir à endosser, en plus, le rôle de celle qui rassure les autres.

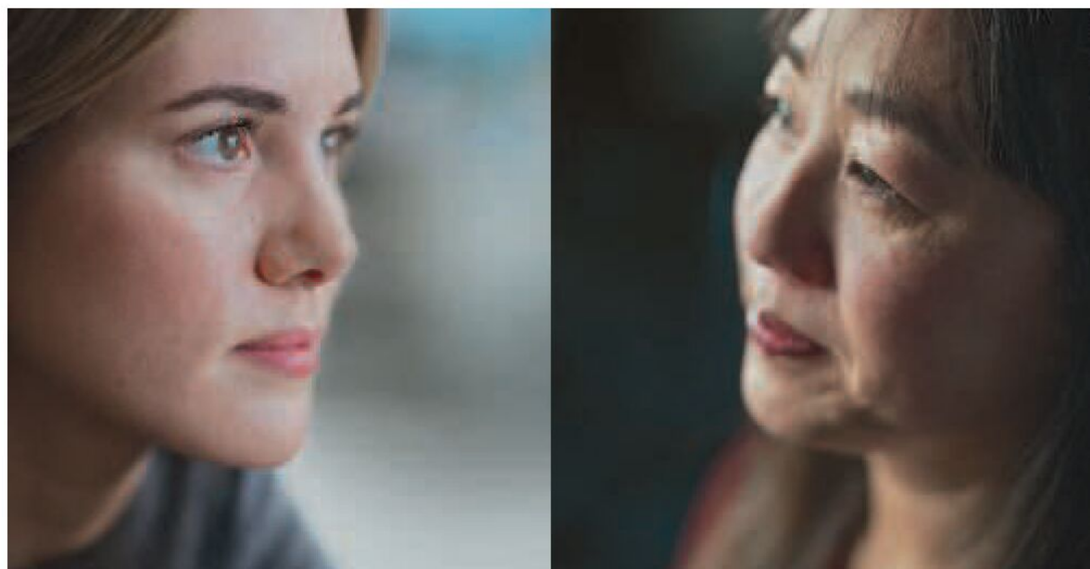
Pour Manda, institutrice, le travail était une échappatoire. Quand on est avec des enfants, on est entièrement là. On pense à tout… Sauf au cancer. Sous peine de se prendre une brique en plastique en pleine tête.

Christine, Jim, Eva, Manda. Ils ne sont pas les seuls.

La majorité des personnes qui peuvent continuer à travailler pendant leur traitement déclarent que cela les aide à tenir. Chaque expérience est différente, mais pour ceux qui en font le choix, garder une activité professionnelle peut apporter un sentiment de normalité, de stabilité et de bien-être.

De nouvelles recherches montrent qu'il existe un lien entre le travail et la qualité de vie des patients atteints d'un cancer. Alors faisons du travail un lieu qui contribue à leur rétablissement.

Pour en savoir plus :
workingwithcancerpledge.com



55%

La part des gènes dans l'espérance de vie

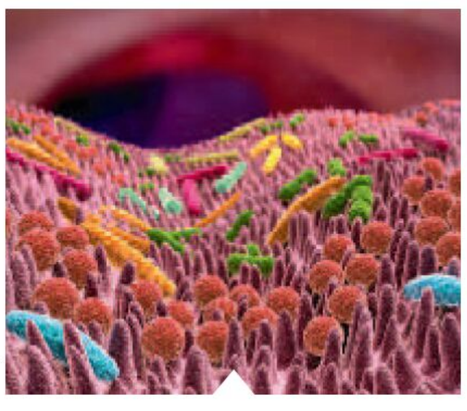
GÉNÉTIQUE Une étude publiée dans *Science* estime que l'espérance de vie serait définie pour plus de la moitié par des gènes hérités. Bien plus que les estimations précédentes (entre 10 et 25 %), qui n'écartaient pas le biais statistique de mortalité extrinsèque (risque infectieux sans antibiotiques, par exemple). Restent 45 % de facteurs liés à l'environnement et, bien sûr, le hasard, qui peut frapper à tout moment. **C. L.**

SOURCE : BEN SHENHAR, INSTITUT WEIZMANN DES SCIENCES, ISRAËL

Nos bactéries façonnent le cerveau

NEUROSCIENCES En transférant un microbiote humain à des souriceaux aseptisés (sans aucun germe en eux), des chercheurs américains ont constaté qu'ils obtenaient des animaux différents de ceux à qui ils avaient greffé un microbiote de macaque. Ils étaient dotés d'une plus grande plasticité synaptique et de cerveaux plus aptes à l'apprentissage. Ce qui confirme que nos bactéries intestinales influent sur notre développement cérébral. **H. R.**

SOURCE : ALEXANDRA DECASIEN, UNIVERSITÉ DE NEW YORK, ÉTATS-UNIS.



SPL/SUCRÉ SALÉ

Le microbiote intestinal est directement lié au cerveau.

L'appendicite se guérit par des antibiotiques

Après vérification du caractère simple de l'appendicite, un traitement antibiotique d'une semaine peut suffire à la soigner.

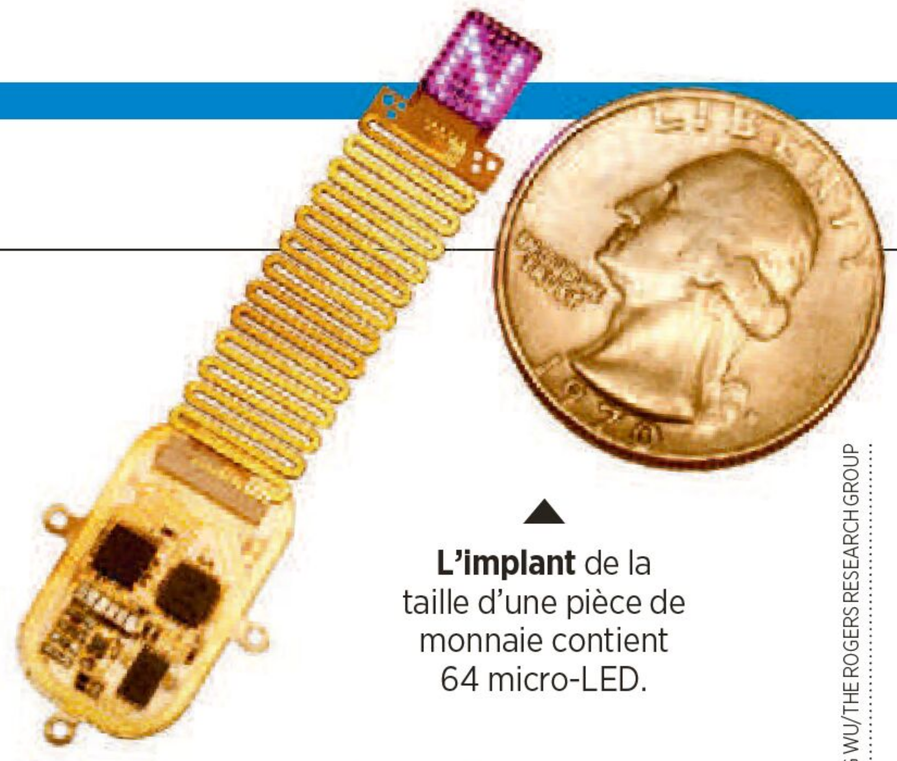
L'ablation de l'appendice enflammé reste la règle en France.

A. PLAWGO/SPL/SUCRÉSALÉ

Dix ans après avoir reçu un traitement antibiotique pour une appendicite aiguë sans complication, plus de la moitié des patients n'ont pas eu de récidive ni besoin d'être opérés pour cette indication, montre une équipe finlandaise de l'université de Turku. Depuis ces travaux pionniers, il s'avère qu'après une vérification par échographie ou scanner du caractère simple de l'appendicite, un traitement antibiotique d'une semaine peut suffire à la soigner. Cette approche permet de réduire fortement les frais liés à une hospitalisation pour une appendicectomie et d'éviter de recourir au service des urgences, soulignent les auteurs dans la revue médicale américaine *Jama*. « *Cependant, l'étude montre aussi que près d'un tiers de ces patients risque de refaire une appendicite dans les cinq ans, et c'est pour cela que les recommandations françaises positionnent toujours la chirurgie comme le traitement de première intention pour l'appendicite simple* », précise Maxime Collard, chirurgien à l'hôpital Saint-Antoine, à Paris.

Une utilisation préventive dans certains cas

Cette opération s'est aussi allégée depuis quelques années et se pratique le plus souvent par voie mini-invasive sous cœlioscopie, avec l'avantage de ne laisser qu'une petite cicatrice et de causer moins de douleurs postopératoires. « *De plus, maintenant, cette opération est souvent effectuée en ambulatoire. Cette prise en charge moins lourde est en cours d'évaluation dans le pays car elle réduit aussi les coûts de l'hospitalisation* », ajoute le spécialiste. Son caractère définitif permet enfin d'éviter au patient l'incertitude liée à une possible récidive. Le traitement antibiotique peut néanmoins être utilisé dans certains cas, par exemple à titre préventif si la chirurgie ne peut être pratiquée rapidement après la crise d'appendicite, mais « *s'avère exclu chez la femme enceinte car il présente un risque avéré d'induire une fausse couche* », prévient le praticien. **P. K.**



L'implant de la taille d'une pièce de monnaie contient 64 micro-LED.

MINGZHENG WU/THE ROGERS RESEARCH GROUP

Un pont lumineux vers le cortex

NEUROTECHNOLOGIE Des chercheurs américains ont développé un implant sans fil capable d'envoyer des informations directement au cerveau par la lumière. Placé sous le cuir chevelu, ce système souple projette des motifs lumineux précis à travers le crâne pour activer des neurones génétiquement sensibles à la lumière. Testé chez la souris, ce prototype ouvre la voie à des prothèses sensorielles ou à de nouvelles stratégies de neurorééducation. **N. G. C.**

SOURCE : MINGZHENG WU, UNIV. NORTHWESTERN, ÉTATS-UNIS.

Premier antidote contre la ricine

TOXICOLOGIE L'entreprise lyonnaise Fabentech vient d'obtenir une autorisation de mise sur le marché pour Ricimed, le premier antidote contre la ricine, plus puissant poison connu chez les végétaux, considéré comme l'une des principales menaces biologiques. L'arrivée de ce traitement a été saluée dans un communiqué commun des ministères des Armées et de la Santé et de la Direction générale de l'armement, ayant soutenu de longue date ces travaux. **S. R.-M.**

IL A DIT

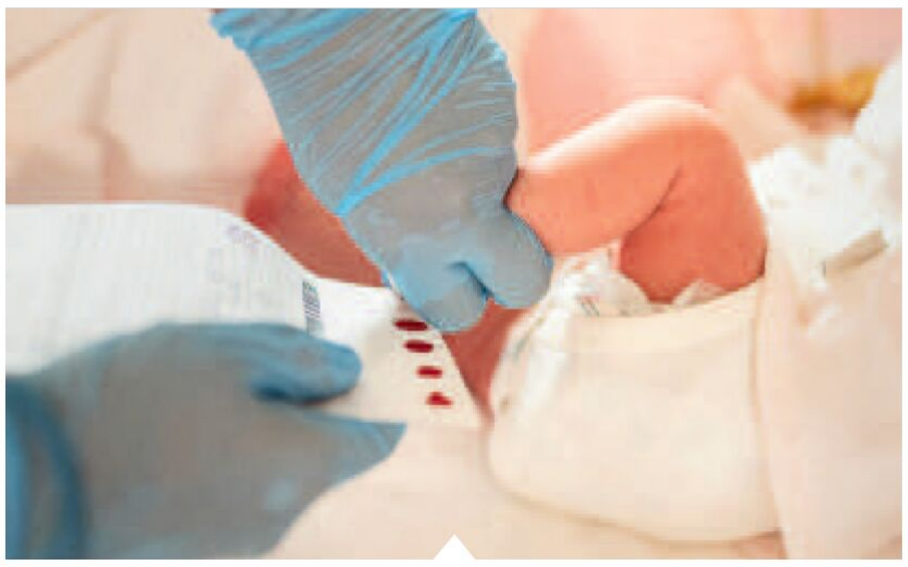
« Il est rassurant de constater que les études analysées ne suggèrent pas que l'utilisation du paracétamol pendant la grossesse soit associée à un risque accru d'autisme ou autres troubles neurodéveloppementaux »

Ian Douglas, professeur de pharmaco-épidémiologie à la London School of Hygiene & Tropical Medicine (Royaume-Uni), en commentaire d'une nouvelle méta-analyse montrant qu'aucun lien ne peut être établi entre la prise de paracétamol et l'autisme ou les troubles de l'attention (TDAH).

Prématurité : un index sanguin permet d'anticiper les complications

NÉONATALOGIE Les enfants nés prématurément entre 22 et 29 semaines de gestation peuvent présenter de graves affections (poumons, intestins, cœur ou rétine). Ce risque est détectable dès les premiers jours par la mesure d'une quarantaine de métabolites dans une goutte de sang, selon une équipe américaine. Cet index métabolique, obtenu par une IA entraînée sur plus de 13 000 nouveau-nés, peut orienter plus rapidement le traitement de ces complications. **P. K.**

SOURCE : ALAN CHANG, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.



GETTY IMAGES

Les échantillons analysés par IA de plus de 13 000 prématurés ont permis de mettre au point l'outil de prédiction de maladies.

JOEL SAGET / AFP

QUESTIONS À

Dominique Costagliola

Directrice de recherches à l'institut Pierre-Louis d'épidémiologie et de santé publique

Donner des outils pour débusquer les « fake news »

Un rapport d'experts remis au gouvernement révèle que 47 % des Français déclarent avoir déjà été exposés à de la désinformation en santé, dont le ministère de la Santé entend faire une priorité. Entretien avec l'une des auteures de ce rapport.

Comment s'attaquer aux « fake news » ?
Il faut donner aux gens des outils pour décoder les informations disparates dont ils sont bombardés et faire les bons choix pour leur santé. Et chaque organisation (universités, académies, sociétés savantes…) doit aussi faire sa propre introspection. Cela demande du temps, mais peu de moyens, c'est faisable.

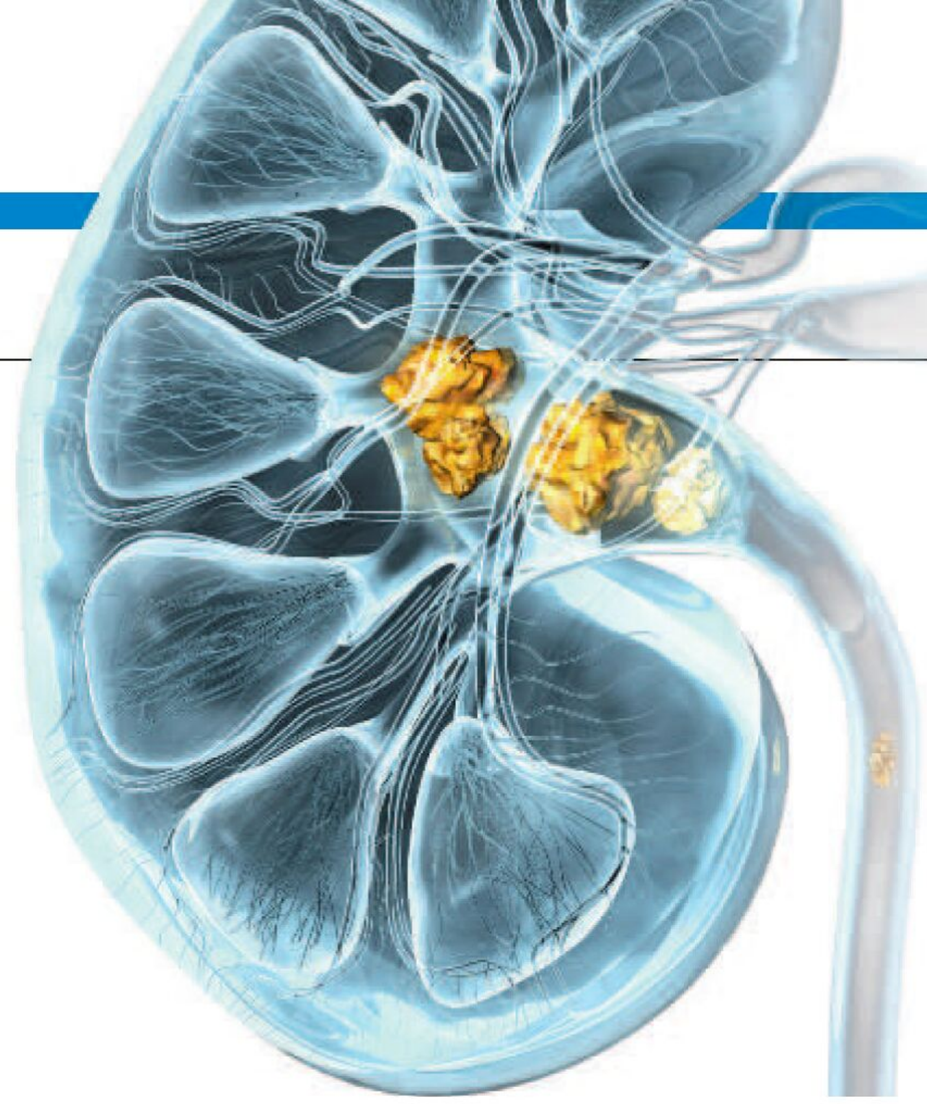
Quelles sont les conséquences de cette désinformation ?
Des gens qui ne se font pas vacciner et tombent gravement malades.
Ou des malades qui renoncent aux soins en cancérologie pour se tourner vers de la « poudre de perlimpinpin » et arrivent à l'hôpital dans un état grave. Cela a un coût sur le plan personnel et pour la communauté.

Un conseil à donner à nos lecteurs ?
Il faut vérifier que les affirmations qu'ils rencontrent ont des sources sûres, si elles sont scientifiques et émanent de revues de bon niveau. L'enseignement et la formation à la science, l'esprit critique prennent du temps. Mais dans l'idéal, cela doit durer toute la vie, de l'école à l'Ehpad.

Propos recueillis par C. L.

Des bactéries se logent dans les calculs rénaux

Cela suggère qu'elles peuvent jouer un rôle biologique dans la croissance des calculs rénaux, ouvrant de nouvelles pistes thérapeutiques.

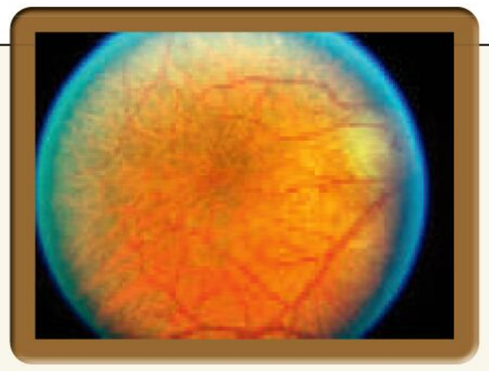


Concrétions visibles (en jaune) à l'entrée du rein.

SCIENCE SOURCE/BSIP

Les calculs rénaux sont habituellement décrits comme de simples agrégats minéraux formés par précipitation chimique. Une vision aujourd'hui bousculée, puisque de récents travaux dirigés depuis l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis) indiquent que des bactéries peuvent être intégrées au cœur même des calculs. En analysant des fragments de calculs d'oxalate de calcium, qui représentent 80 % des lithiases, les chercheurs ont observé la présence de bactéries vivantes, parfois identiques à celles responsables d'infections urinaires récurrentes. Ces micro-organismes semblent déclencher la formation du calcul et favoriseraient sa croissance et sa stabilité en servant de support à la cristallisation, grâce à la formation de biofilms. Cette découverte pourrait expliquer pourquoi certains patients développent des calculs à répétition malgré les mesures préventives combinant hydratation et recommandations alimentaires. Elle ouvre aussi la voie à des stratégies thérapeutiques nouvelles, ciblant non seulement la chimie de l'urine, mais aussi son microbiome. **J. I.**

À VOIR SUR LE NET



Une chirurgie de la cataracte filmée en conditions réelles

OPHTALMOLOGIE Une chirurgie complète de la cataracte, filmée en conditions réelles, est présentée pour la première fois avec un double dispositif d'imagerie. La vidéo combine la vue d'un microscope chirurgical numérique et une imagerie OCT en temps réel, permettant de suivre pas à pas l'intervention réalisée à la Fondation Rothschild, à Paris, et d'observer en continu les structures de l'œil pendant l'opération. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

SCIENCE SOURCE/PHANIE

400 GRAMMES

La reprise de poids mensuelle après arrêt d'un traitement GLP-1

THÉRAPEUTIQUE Une méta-analyse, parue dans le *British Medical Journal,* ayant passé en revue 37 études consacrées à divers traitements amaigrissants, a établi que l'arrêt des nouveaux médicaments contre l'obésité (Ozempic, Wegovy…) s'accompagnait en moyenne d'une reprise de 400 g par mois. De sorte que, selon l'étude, la majorité des patients retrouveraient leur poids de départ dans un délai compris entre 18 et 24 mois. **S. R.-M.**

L'œil de Lascar

LE CHEF DE L'ÉTAT a demandé à des experts d'évaluer les risques des jeux vidéo sur la santé mentale des jeunes. Expliquant vouloir *« mesurer scientifiquement »* leurs effets sur eux, il estime que passer *« cinq ou six heures par jour à tuer des gens »* peut les désinhiber et parfois les pousser *« à commettre le pire ».*

L'éclairage urbain allonge la saison des allergies

ALLERGOLOGIE Du fait du rôle important de la lumière pour les cycles de développement des plantes et de leur floraison, l'éclairage nocturne prolongerait la saison des pollens. Une étude dans le nord-est des Etats-Unis montre qu'elle débute 20 jours plus tôt et s'achève plus tard dans les zones fortement illuminées, avec davantage de pics de concentrations. L'effet, indépendant des pluies mais renforcé par la chaleur, pourrait aggraver rhinites et asthme. **P. K.**

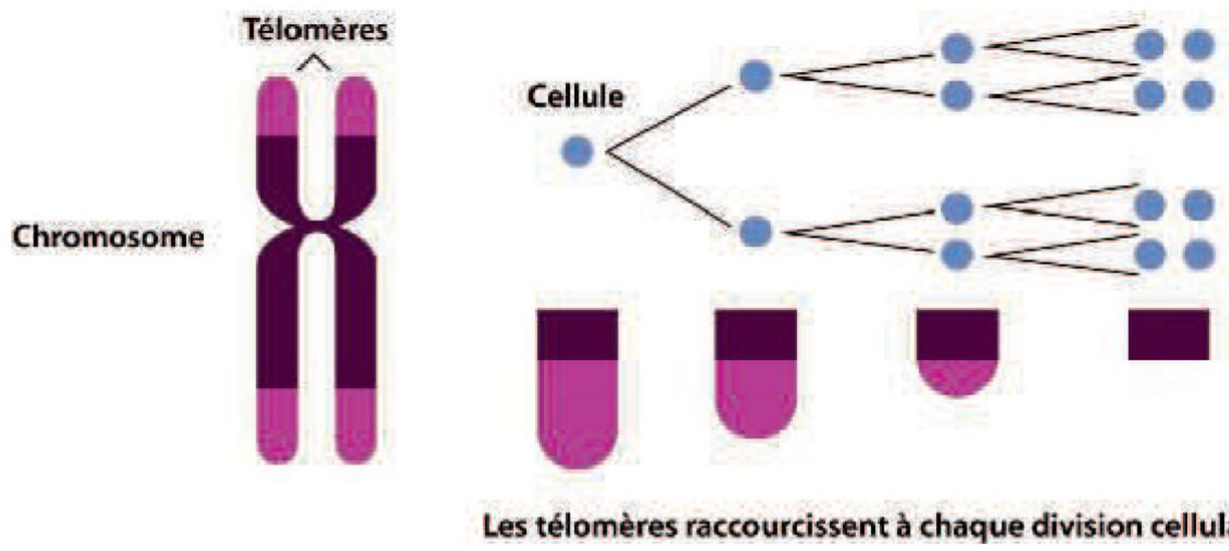
SOURCE : BRANDT GEIST, UNIVERSITÉ VANDERBILT, ÉTATS-UNIS.

PHYTO RESEARCH

Télomères et longévité

PUBLICITÉ

Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).



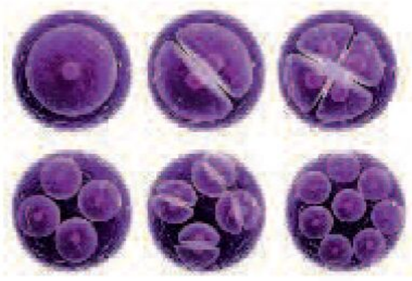
Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes



Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase

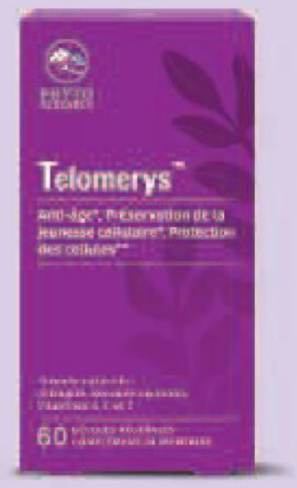
Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

ASTRAGALE ET TÉLOMÈRES

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. **Telomerys** associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

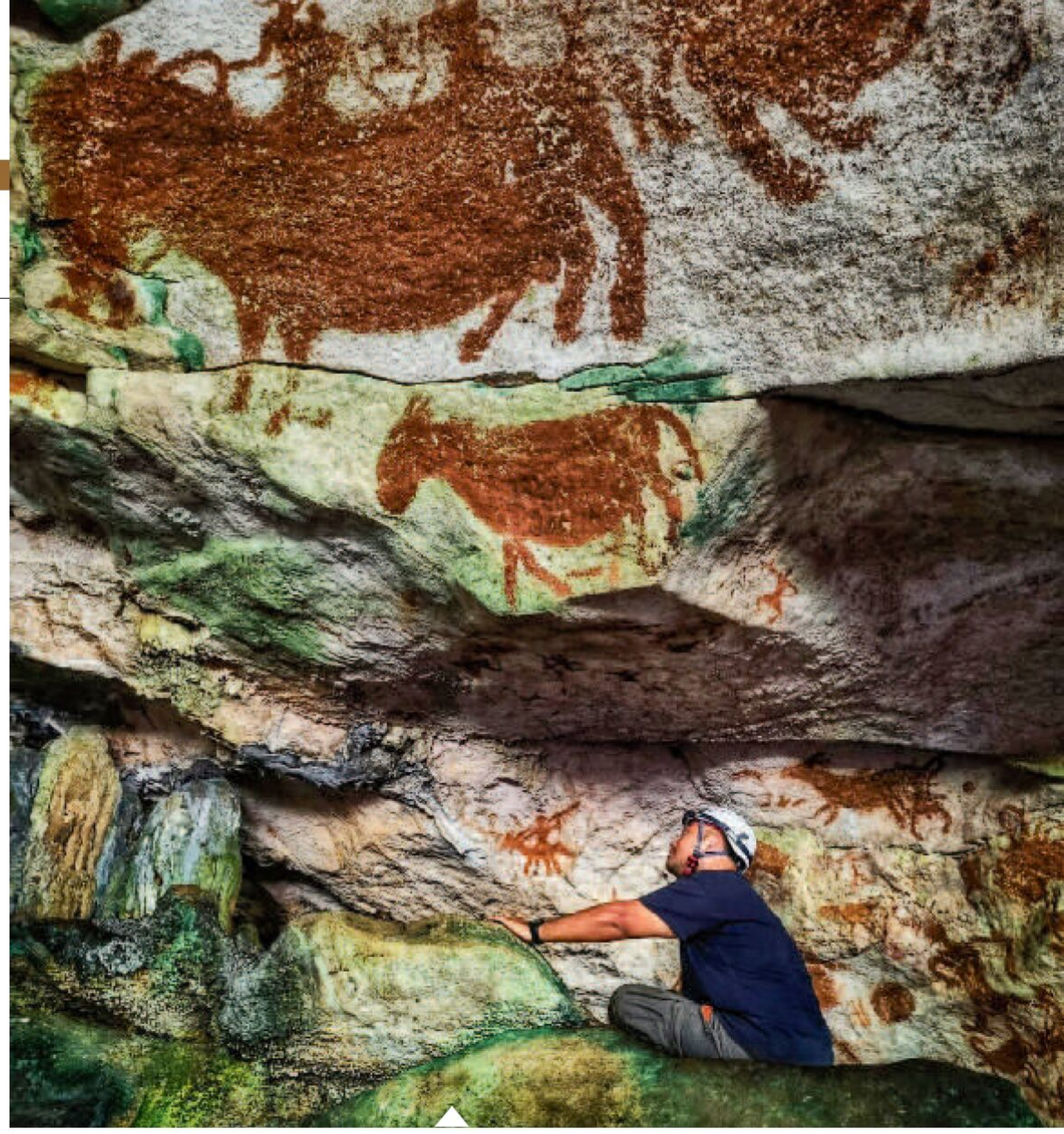
Livraison à domicile

Passez votre commande au **01 84 21 31 89** et sur www.vitalco.com

Telomerys™ est sélectionné et distribué par Vitalco.

La plus vieille peinture rupestre au monde

Les découvertes se multiplient dans les grottes ornées d'une île indonésienne: une simple main dessinée au pochoir a été datée à -67800 ans.



La grotte ornée de Liang Metanduno (Sulawesi), où a été découverte la très discrète empreinte de main.

M. AUBERT / GRIFFITH UNIVERSITY / AFP

Longtemps, les plus anciennes peintures de l'humanité ont été situées à Chauvet, en France (36 000 ans), ou à El Castillo, en Espagne (40 000 ans). Mais depuis quelques années, l'île de Célèbes, en Indonésie (Sulawesi, en indonésien), qui regorge de grottes ornées, détrône l'Europe. La dernière découverte, décrite dans *Nature*, vient de pulvériser tous les records : une main dessinée au pochoir, dont l'empreinte claire se détache faiblement du contour ocre formé par la projection de pigments, a au moins 67 800 ans. L'équipe derrière la trouvaille — celle de l'archéologue et géochimiste à l'université Griffith (Australie) Maxime Aubert — avait déjà révélé en 2024 des figures humaines interagissant avec un porc, identifiées dans une autre grotte de Sulawesi *(lire* S. et A. n° *931)*. Datées de -51 200 ans, elles constituaient la plus ancienne peinture « narrative » connue.

Une méthode de datation ultra-précise

Cette fois-ci, l'ancestral dessin se trouve à Muna, une île tropicale au sud-est de Sulawesi, dans une grotte que les habitants surnomment Liang Metanduno. Riche de représentations d'animaux, de guerriers ou de bateaux déjà connues de la population locale et des chercheurs, elle abritait sur un tronçon de son plafond la très discrète empreinte de main. Pour estimer l'âge de la peinture, l'équipe a employé la méthode uranium-thorium par ablation laser, qui permet une datation précise des œuvres rupestres exécutées à l'ocre. Celle-ci consiste à utiliser un laser pour prélever et analyser une quantité minuscule de dépôts de carbonate de calcium formés au-dessus d'une couche pigmentée. Dans le laboratoire de l'université Southern Cross (Australie), le pochoir en forme de griffe a ainsi été daté entre -75 400 et -67 800 ans. Cette nouvelle découverte démontre non seulement que notre espèce était présente dans l'archipel indonésien à cette époque, mais aussi que les premiers humains modernes vivant dans cette région au pléistocène supérieur possédaient déjà une cognition sophistiquée, bien avant qu'ils ne mettent le pied en Europe. ■ **M. B.**

AKG IMAGES

La chasse à la baleine a débuté en Amérique du Sud

ANTHROPOLOGIE La chasse organisée aux grandes baleines en Amérique du Sud a débuté il y a 5000 ans, soit mille ans plus tôt qu'estimé. L'analyse d'ossements de cétacés associés à des harpons façonnés par des sociétés côtières du sud du Brésil atteste de techniques spécialisées déjà maîtrisées. Ces résultats bousculent l'idée d'une origine nordique de la chasse à la baleine. **H. J.**

SOURCE : KRISTA MCGRATH, UNIVERSITÉ AUTONOME DE BARCELONE, ESPAGNE

La voix d'Henri IV (presque) reconstituée

HISTOIRE Des chercheurs français ont en partie reconstitué ce qu'ils considèrent comme la voix d'Henri IV (1553-1610) grâce à une modélisation 3D du tractus vocal extraite de sa supposée tête momifiée. En combinant imagerie médicale et simulations acoustiques, ils ont généré des sons plausibles comparables à des voyelles. Pour l'instant, l'audio obtenu se limite toutefois à des « a » et « o », sans aucun mot articulé, loin d'une véritable restitution de la parole du souverain. **S. R.-M.**

SOURCE : ROBIN BAUDOUIN, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE

Hérodote avait raison

ANTIQUITÉ Des analyses récentes de plaque dentaire menées sur des squelettes scythes du VIIIe au IIIe siècle avant notre ère ont permis d'identifier des protéines de lait, dont celles de jument. Cette preuve biomoléculaire confirme une pratique décrite par Hérodote (*Histoires*, IV), qui racontait que les Scythes trayaient les juments et buvaient leur lait fermenté. Un rare cas où l'archéologie valide mot pour mot un auteur antique. **M. B.**

SOURCE : JARUSCHKA PECNIK, UNIVERSITÉ DE ZURICH, SUISSE.

45 KM/H

La vitesse d'un dinosaure mongol

PALÉONTOLOGIE **Des empreintes découvertes en Mongolie intérieure ont permis d'estimer la vitesse de pointe de *Chapus lockleyi*, un théropode de 2,65 mètres de long. L'analyse d'une foulée de 5,3 m relevée sur une piste de plus de 80 m — la plus longue connue en Chine — suggère qu'il pouvait atteindre 41 à 45 km/h, pour environ 110 kg.** **J. I.**

SOURCE : YANG LI, UNIVERSITÉ NORMALE DE SHENYANG, CHINE.

COLCHESTER & IPSWICH MUSEUM SERVICE

Le « sceau secret » de Richard

ARCHÉOLOGIE Dans un champ du sud-est de l'Angleterre, un chercheur amateur muni d'un détecteur de métaux a mis au jour un étonnant sceau en argent du XIIIe ou XIVe siècle, avec en son centre une pierre gravée d'origine romaine vieille d'environ 2000 ans. Gravée en miroir, la mention latine « SECRETVM RICARDI », signifiant « le secret de Richard », du prénom de son propriétaire. Cette association matérielle entre deux périodes historiques distantes d'un millénaire est exceptionnelle dans l'archéologie européenne. **M. B.**

STEPHANE DE SAKUTIN / AFP

Mieux éclairés, les cernes de croissance des os se sont avérés plus nombreux.

Le T. rex revoit sa courbe de croissance

« Tyrannosaurus rex » continuait de grandir jusqu'à 40 ans, alors que l'arrêt de sa croissance était jusqu'ici estimé vers 25 ans.

Malgré des décennies de recherches, *Tyrannosaurus rex* continue de surprendre ! Alors que l'arrêt de sa croissance était estimé autour de 25 ans, une étude américaine indique qu'elle était peut-être plus longue et progressive encore, pouvant se prolonger jusqu'à environ 40 ans. Ce réajustement repose sur l'identification d'anneaux de croissance passés inaperçus jusqu'ici, révélés grâce à l'utilisation de lumière polarisée. Ces marques montrent aussi une forte variabilité d'une année sur l'autre, probablement en lien avec les conditions environnementales. Cette croissance allongée implique des individus très différents coexistant dans les mêmes écosystèmes, des jeunes encore relativement graciles aux adultes massifs.

L'analyse révèle toutefois une anomalie : deux spécimens de petite taille, nommés Jane et Petey, présentent des trajectoires de croissance statistiquement différentes. Ces fossiles pourraient appartenir à une autre espèce de tyrannosaure confondue avec le *T. rex*. **J. I.**

Plongée dans les rangs de la guerre de Cent Ans

HISTOIRE Les parcours de vie de 290 000 soldats anglais du Moyen Âge ont été regroupés dans une base de données inédite*. Constituée à partir des archives de paye royales de la guerre de Cent Ans (1337-1453), la plateforme en ligne permet de rechercher un nom, de suivre une carrière militaire ou d'explorer les origines géographiques des combattants de ce conflit. **H. J.**

* sciav.fr/949centans

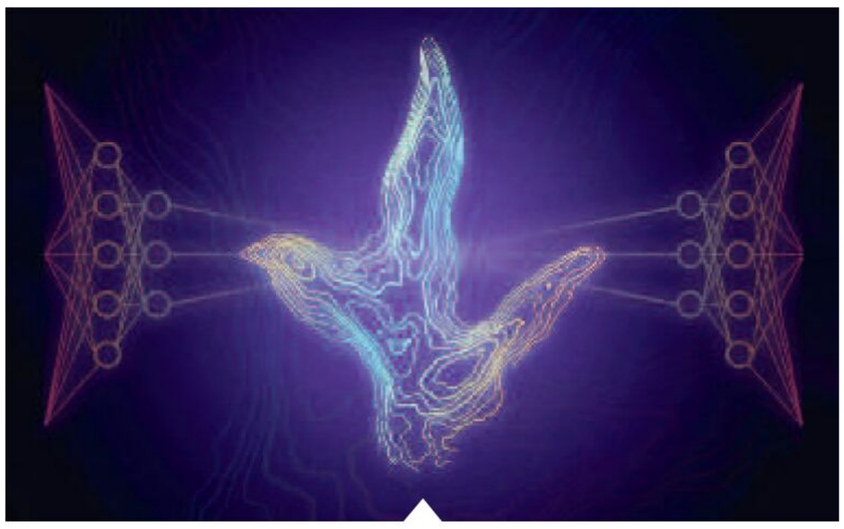
BIBLIOTHÈQUE NATIONALE PARIS / AURIMAGES

La bataille de Crécy en 1346, illustration tirée des « Chroniques » de Jean Froissart (1337-1404).

Une IA pour lire les empreintes de dinosaures

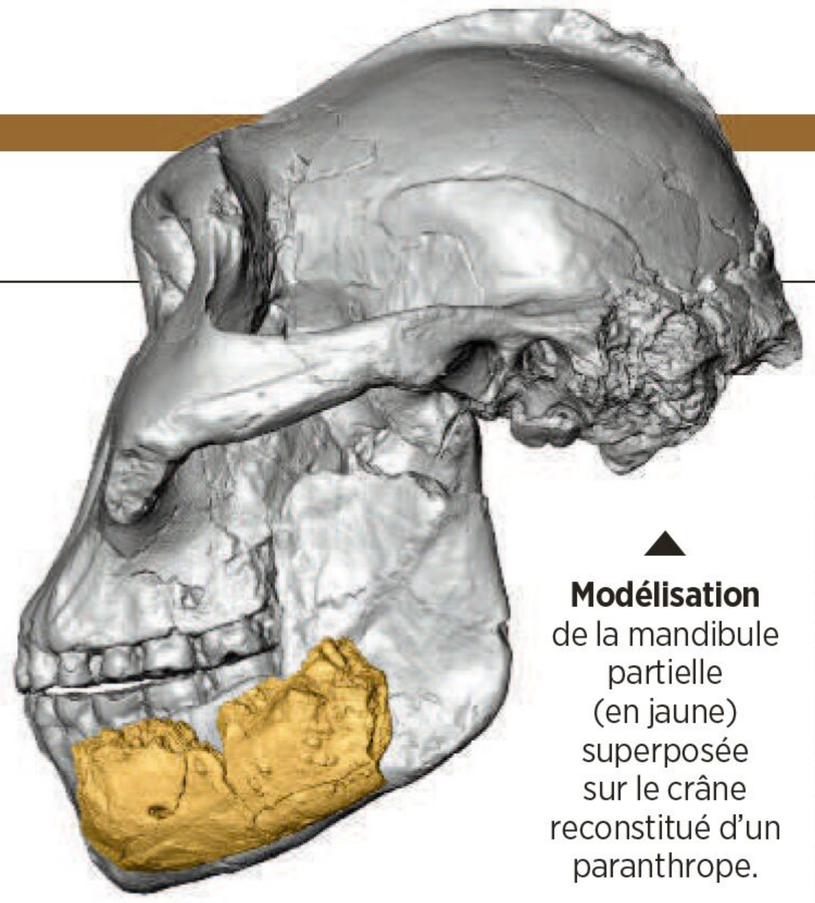
PALÉONTOLOGIE
Un outil d'intelligence artificielle a été entraîné à identifier les auteurs d'empreintes vieilles de millions d'années. DinoTracker s'appuie sur 2000 traces fossiles et des millions de simulations pour analyser la forme des doigts et l'appui du pied, avec environ 90 % de concordance. **H. J.**

SOURCE : S. BRUSATTE, UNIVERSITÉ D'ÉDIMBOURG, ROYAUME-UNI.



TONE BLAKESLEY

Analyse algorithmique d'une empreinte de dinosaure mise au jour sur l'île de Skye (Écosse).



FRED SPOOR, NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON

Modélisation de la mandibule partielle (en jaune) superposée sur le crâne reconstitué d'un paranthrope.

Paranthrope : une autre voie de l'humanité

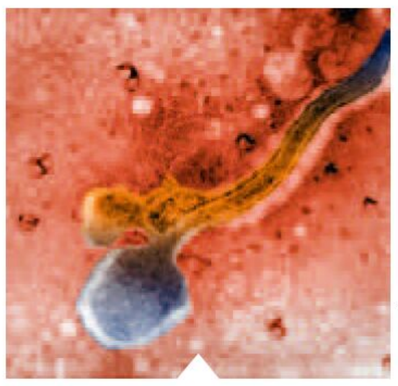
ANTHROPOLOGIE Les paranthropes, ces hominines robustes apparus il y a environ 2,7 millions d'années, ne se limitaient pas aux régions méridionales de l'Afrique. La découverte d'une mâchoire partielle, vieille de 2,6 millions d'années, au nord-est de l'Éthiopie, étend leur aire de répartition connue de plus de 1000 kilomètres vers le nord. Cette présence remet en cause l'idée d'un groupe géographiquement restreint et spécialisé sur le plan alimentaire. Elle suggère une dispersion bien plus large qu'on ne l'imaginait jusqu'ici. **J. I.**

SOURCE : ZERESENAY ALEMSEGED, UNIVERSITÉ DE CHICAGO, ÉTATS-UNIS.

Aux origines de la syphilis

PALÉOPATHOLOGIE
Trouvée en Colombie dans les squelettes de chasseurs-cueilleurs datant de -5500 ans, la bactérie *Treponema pallidum*, agent causal de la syphilis, s'avère avoir infecté les humains depuis deux fois plus longtemps qu'on ne le pensait. L'originalité de la découverte : ce n'est pas dans les dents mais dans un tibia que le pathogène a été découvert. **H. R.**

SOURCE : DAVIDE BOZZI, UNIVERSITÉ DE LAUSANNE, SUISSE.



VOISIN/PHANIE

« Treponema pallidum » vu au microscope.

Les premiers motifs floraux étaient déjà mathématiques

Avant l'apparition de l'écriture des nombres, des signes d'une pensée mathématique ont été identifiés sur des poteries antiques.

Des poteries vieilles de plus de 8000 ans, retrouvées dans le nord de la Mésopotamie (actuel Irak), livrent la plus ancienne représentation systématique de motifs végétaux dans l'art humain — et peut-être les premiers signes d'une pensée mathématique, selon une étude menée par des archéologues de l'université hébraïque de Jérusalem (Israël). Ils ont analysé plusieurs centaines de dessins de fleurs, de branches, d'arbres et de jeunes pousses sur des céramiques datées entre 6200 et 5500 avant notre ère. Selon les chercheurs, ces motifs retrouvés sur 29 sites différents ne sont pas de simples ornementations ; certains dévoilent des progressions numériques évidentes avec des fleurs représentées par 4, 8, 16, 32 ou 64 pétales d'après une structure géométrique répétitive. Un ordonnancement intentionnel pour les chercheurs, qui montrerait que les communautés agricoles d'alors maîtrisaient déjà une forme de raisonnement spatial et numérique intuitif bien avant l'apparition de l'écriture des nombres en Mésopotamie, vers 3300 avant notre ère. **H. J.**

BRITISH MUSEUM, UCL

Sur ces poteries vieilles de 8000 ans découvertes en Irak, les motifs floraux sont disposés selon une structure géométrique répétitive.

Un rhinocéros laineux dans l'estomac d'un loup

PALÉONTOLOGIE
Des restes de rhinocéros laineux ont été identifiés dans le contenu stomacal fossilisé d'un louveteau mort il y a 14 000 ans. La reconstitution du génome de *Coelodonta antiquitatis* à partir de cet échantillon a montré que l'espèce était encore viable peu avant sa disparition. Ce qui plaide pour une extinction liée à un changement environnemental brutal. **J. I.**

SOURCE : SÓLVEIG GUÐJÓNSDÓTTIR, UNIVERSITÉ DE STOCKHOLM, SUÈDE.

Sophia Boutique, la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR

vous propose

Le sac week-end

49€ SEULEMENT

Caractéristiques techniques :

Matière : toile de canvas
Dimensions : 40 x 64 x 20 cm

Délai de livraison : 2 semaines maximum

Découvrez ce magnifique sac robuste, il est idéal pour vos sortie quotidiennes ou vos escapades du week-end. Ses dimensions généreuses lui offrent une grande praticité.

Doté d'une doublure intérieure, d'une bandoulière réglable et ajustable ainsi que de deux anses pour le porter à la main, il vous garantira un confort d'utilisation optimal.

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____ Code Postal |_|_|_|_|_|

Ville : _____

Téléphone |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

E-mail : _____ @ _____

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique.

DÉSIGNATION	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
Le Sac Week-end	V241		49€	
Frais d'envoi				Offerts
TOTAL DE MA COMMANDE				€

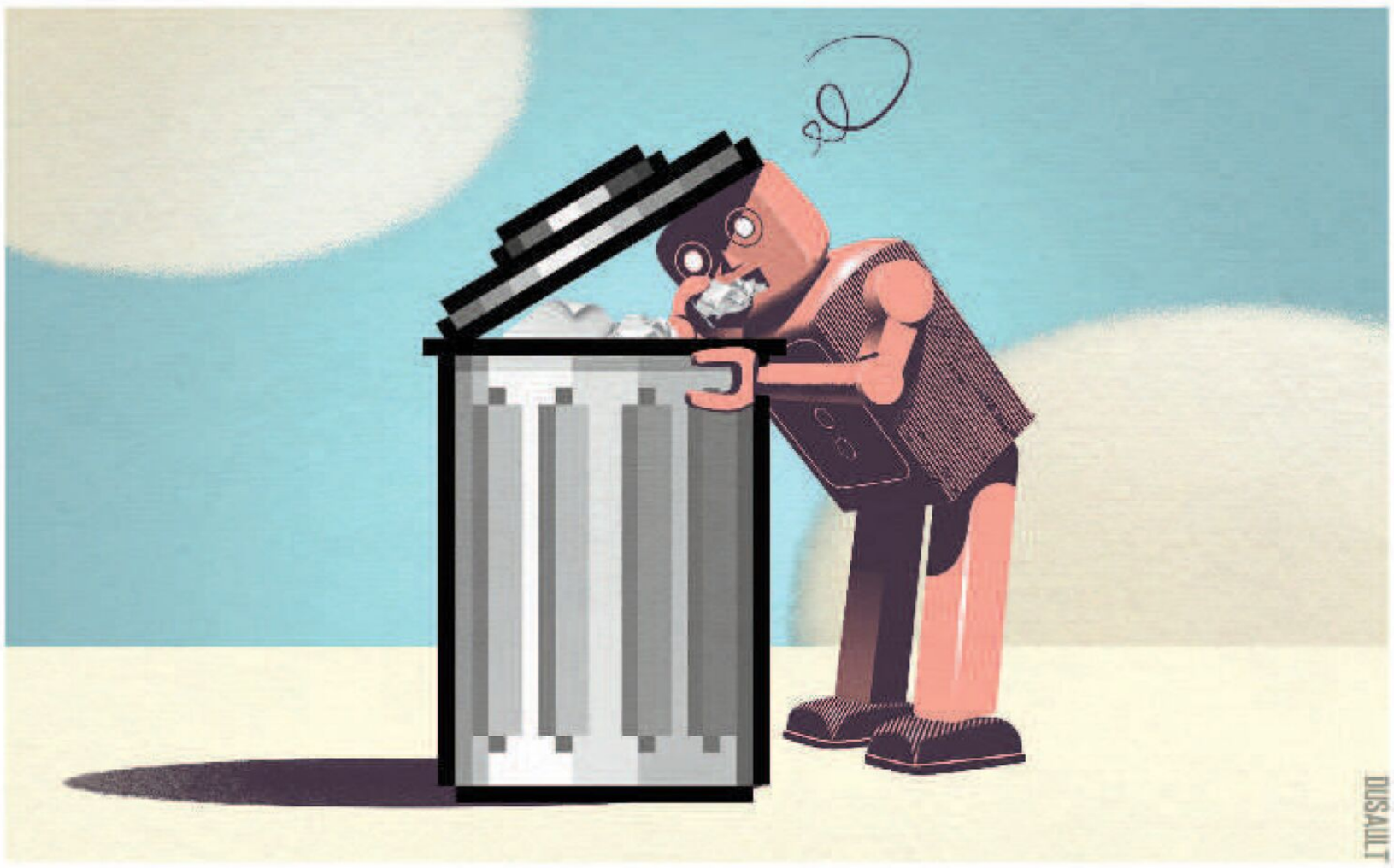
MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de **Sophia Boutique**

Pour régler par carte bancaire merci de contacter le 01 55 56 70 54
en précisant le code PSCA949, ou rdv sur www.sophia-boutique.com

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

PSCA949



ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

L'IA en proie à un « abrutissement »

À l'instar de notre cerveau, un agent conversationnel subirait une chute de sa cognition lorsqu'on l'entraîne avec des contenus en ligne viraux de faible qualité.

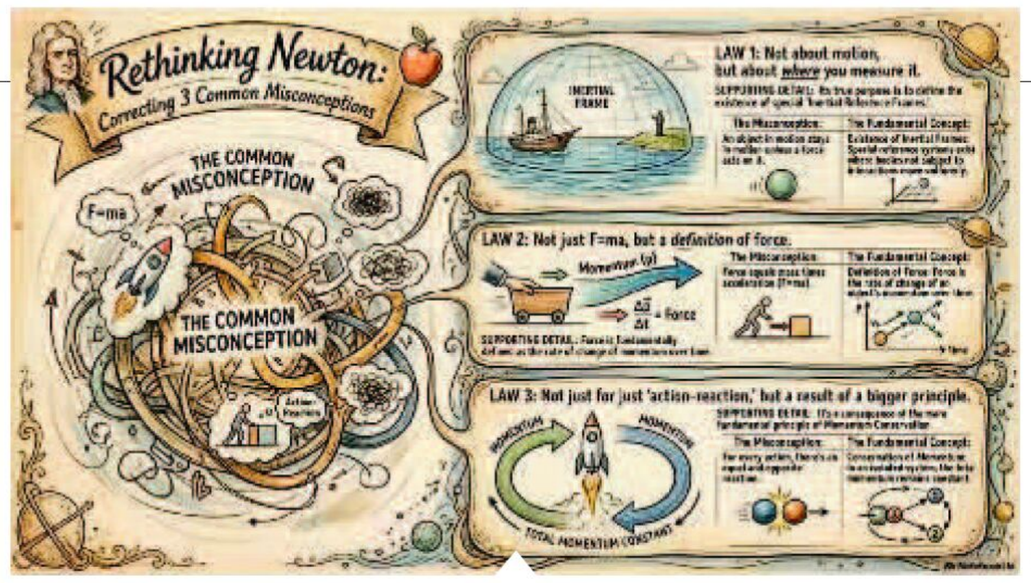
Notre cerveau se détériore avec l'exposition excessive de contenus sans intérêt, l'intelligence artificielle aussi. C'est la conclusion de chercheurs de l'université du Texas à Austin, l'université Purdue et l'université A&M du Texas (États-Unis) dans une étude en prépublication d'octobre 2025. Leur travail fait le parallèle entre cette déficience de l'IA et le *brain rot* (« pourrissement cérébral ») que subiraient les humains passant trop de temps sur les réseaux sociaux. Pour leur travail, les chercheurs ont constitué deux corpus de tweets distincts : courts et viraux d'une part, sensationnalistes de l'autre.

Puis ils ont exposé quatre grands modèles de langage (LLM) open source à des proportions variables de ces données mélangées à des tweets jugés plus qualitatifs. Chaque LLM a ensuite subi une série d'évaluations. C'est la différence entre les résultats fournis par l'IA entraînée avec 100 % de tweets « sains » et ceux issus du même algorithme exposé à 20, 50 ou 80 % de tweets de faible qualité qui témoigne, selon les chercheurs, d'un déclin cognitif durable causé par les mauvais contenus. L'article de recherche mentionne ainsi une perte de précision non négligeable des modèles sur les tests de raisonnement ainsi que *« des capacités nettement moins bonnes pour extraire des informations d'un contexte long »*. Atteinte par le *brain rot*, l'IA se met tantôt à sauter des étapes dans son plan, tantôt à faire des erreurs de logique, mais surtout à répondre n'importe comment, sans aucune étape dans son raisonnement. Des effets d'autant plus inquiétants qu'ils persistent après un nouvel entraînement sur des données de haute qualité. Circonstance aggravante, les tweets utilisés pour cette étude représentent une faible part de la masse de données avec laquelle ces LLM ont été entraînés à l'origine. *« Nous n'avons utilisé que 2 millions de tokens (séquences de caractères) sur des modèles comme Llama3, qui a été pré-entraîné avec 15 milliers de milliards de tokens »*, souligne Junyuan Hong, coauteur de l'étude en tant que postdoctorant à l'université du Texas à Austin. Il en conclut qu'*« une faible quantité de déchets peut causer des dommages importants et durables »*.

2 millions
de mauvaises données d'entraînement issues de tweets ont suffi pour affecter la cognition d'IA pourtant pré-entraînées avec des milliers de milliards de tokens.
(SOURCE : UNIVERSITÉ A&M DU TEXAS, UNIVERSITÉ DU TEXAS À AUSTIN, UNIVERSITÉ PURDUE.)

Vérifier et filtrer les données d'entraînement

Interrogé à ce sujet par le magazine *Forbes*, le chercheur en IA Ilia Shumailov, ancien de Google DeepMind, explique que ces résultats rejoignent les travaux sur l'« empoisonnement » de l'intelligence artificielle. Soit l'injection malveillante de données dans le corpus d'entraînement d'un modèle afin de modifier son comportement. Il affirme toutefois qu'il est difficile d'extrapoler les conclusions de cette étude *« à petite échelle »* et qui n'a pas encore été revue par les pairs. Il y voit surtout un rappel de l'importance d'une vérification soigneuse des données d'entraînement. Les entreprises qui développent les LLM le font déjà, *« mais il se peut qu'elles ne filtrent pas assez les données liées à la viralité en ligne »*, estime Junyuan Hong. ■ **Théo Brajard**



GOOGLE

L'assistant de recherche NotebookLM génère une infographie à partir d'un document donné.

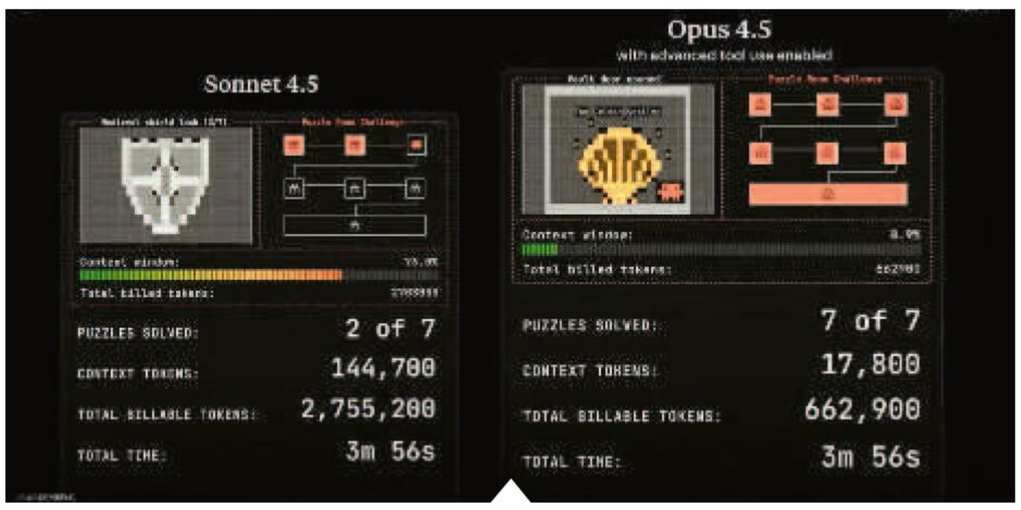
NotebookLM devient infographiste

OUTIL Déjà capable d'analyser des documents, de les résumer ou de créer un podcast à partir des informations fournies, cet outil de Google peut désormais les transformer en infographies. C'est le dernier modèle de génération d'images de la firme qui est ici à l'œuvre, Nano Banana Pro, redoutable pour le rendu du texte. À cette fonction en version bêta, s'ajoute la possibilité de produire une présentation à la façon de PowerPoint. **T. B.**

IL A DIT

« Les deepfakes se dirigent vers une synthèse en temps réel capable de produire des vidéos reproduisant fidèlement les subtilités de l'apparence humaine »

Siwei Lyu, professeur d'informatique et directeur du Media Forensic Lab de l'université de Buffalo (États-Unis) sur le site The Conversation.

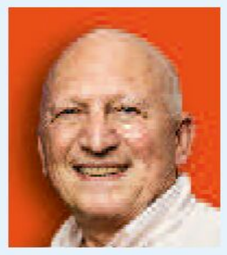


ANTHROPIC

Le dernier modèle d'Anthropic est plus performant que Sonnet 4.5.

Claude Opus 4.5 : prêt à coder

CODAGE Fin novembre 2025, c'était au tour d'Anthropic de présenter son dernier modèle d'intelligence artificielle générative le plus avancé à ce jour, après GPT-5.1 d'OpenAI et Gemini 3 Pro de Google. L'entreprise américaine d'IA a notamment insisté sur sa capacité à générer et corriger du code. Un domaine dans lequel Claude Opus 4.5 surpasserait significativement ses concurrents, si l'on en croit les scores affichés par ses concepteurs sur des tests comme le SWE-Bench Verified. **T. B.**



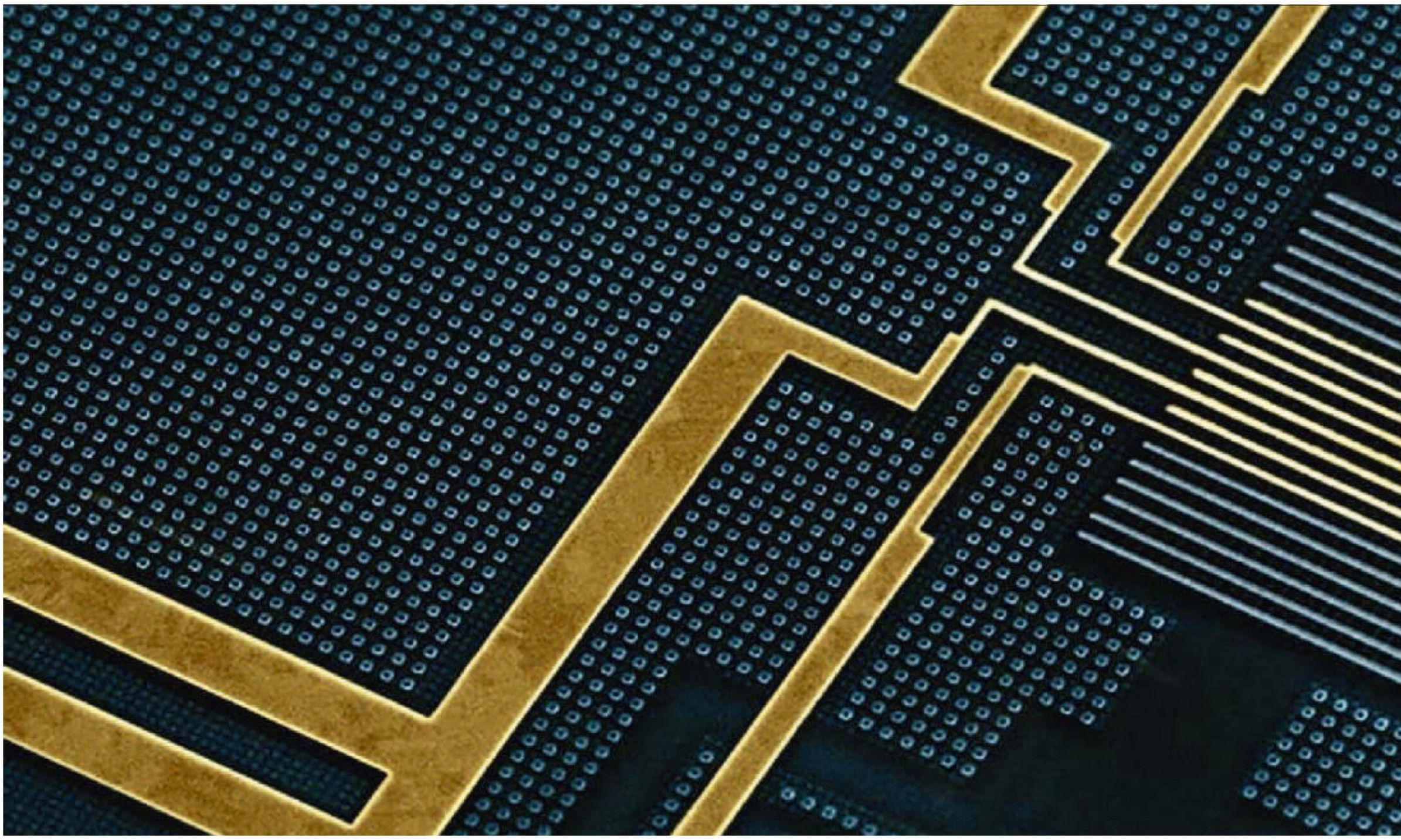
BRUNO LÉVY

LA CHRONIQUE DE
JEAN-GABRIEL GANASCIA*

L'éthique de l'IA selon Saint Musk

Les logiciels de déshabillage font florès chez les adolescents. Avec eux, on change à loisir, et virtuellement, les vêtements sur une photo. Il est loisible aussi de les enlever un à un, jusqu'à générer des images dénudées qu'on diffuse ensuite sur les réseaux, ce qui prête à confusion et avilit. Des jeunes femmes en ont fait les frais, en particulier avec ce qu'on appelle le *revenge porn* qui fait que des jeunes gens éconduits disséminent par dépit de fausses images outrageantes de la belle indifférente. Elles en ont ressenti une grande mortification, au point que certaines sont allées jusqu'au suicide. Dans sa forme actuelle, le règlement européen sur l'intelligence artificielle ne fournit pas d'outils juridiques condamnant avec vigueur de telles pratiques. Heureusement, il existe des législations nationales qui le permettent. Sachant la popularité de ces logiciels, l'agent conversationnel d'IA d'Elon Musk, Grok, en offre un à ses utilisateurs avec un « mode épicé » (*spicy mode*) produisant à volonté des images érotiques et les divulguant. Beaucoup s'en sont offusqués. La Commission européenne, par la voix d'un de ses porte-parole, Thomas Regnier, a exigé, au nom de la législation sur les services numériques — le DSA —, que l'on ferme l'accès à cette fonctionnalité et, surtout, que l'on interdise la divulgation des images offensantes. Dans un élan de moralité, et pour éviter un procès coûteux, Elon Musk a donné satisfaction à une partie de ces demandes en réservant l'accès du « mode épicé » aux seuls utilisateurs payants. Résultat : leur nombre a considérablement augmenté, ce qui a d'autant accru ses bénéfices…
Mise en pratique majestueuse du principe de maximisation de l'utilité de l'éthique utilitariste ou fourberie, ou encore diablerie ? On laisse au lecteur le soin d'en juger… ■

* **Professeur à Sorbonne Université,** à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.



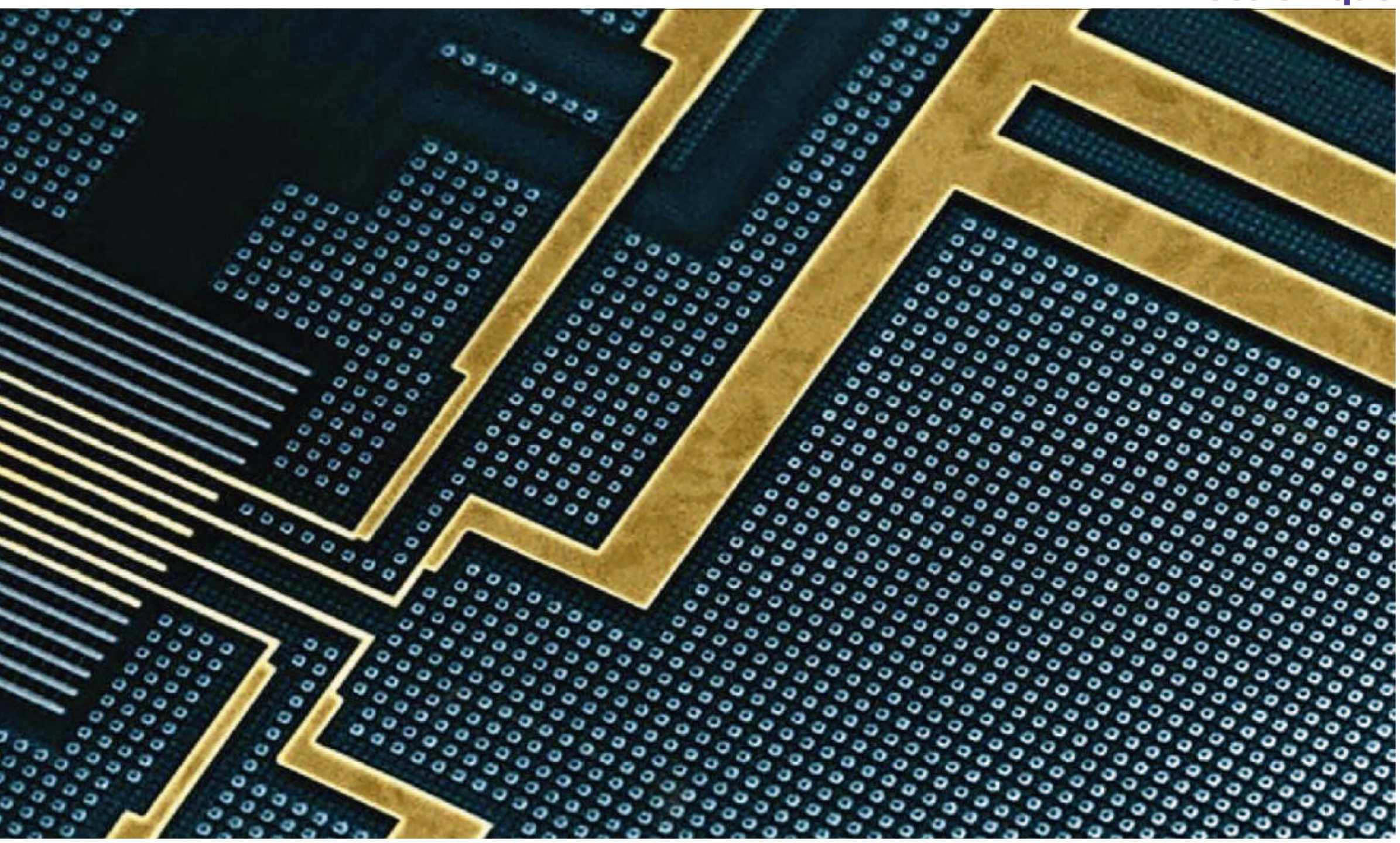
IMEC

Spintronique

L'électronique gagne en rapidité et en sobriété

Issue de la découverte de la magnétorésistance géante dans les années 1980, la spintronique exploite les propriétés quantiques de l'électron pour lire, écrire et bientôt traiter l'information bien plus rapidement que l'électronique classique, et en consommant beaucoup moins d'énergie. À Grenoble, la ligne pilote Spinfab prépare le passage à l'échelle industrielle de ces technologies.

Par Fabrice Nicot



Au cœur du vaste campus scientifique du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) de Grenoble, une installation au nom intrigant a été inaugurée l'an dernier : Spinfab. Il s'agit d'une vaste salle aux murs blancs abritant une ligne de machines métalliques massives, soigneusement alignées, reliées par une forêt de câbles et de tuyaux… Une respiration régulière emplit la pièce. C'est le bruit des pompes qui entretiennent le vide à l'intérieur de chambres étanches, où l'on façonne la matière en fines tranches de quelques atomes d'épaisseur. On y fabrique ainsi d'étranges sandwichs à base de matériaux — magnétiques et d'oxydes — d'une hauteur ne dépassant pas une vingtaine de nanomètres, soit environ 5000 fois plus fins qu'un cheveu. Spinfab n'est pas une usine, mais elle la préfigure. C'est une ligne pilote, à mi-chemin entre la recherche et l'industrie. Chercheurs et ingénieurs y fabriquent, testent, peaufinent les briques élémentaires d'une électronique nouvelle, des composants « spintroniques », appelés à sortir demain des laboratoires pour rejoindre les lignes de production.

La spintronique, c'est le futur de l'électronique — ou plus exactement son prolongement. Sans bruit, elle s'est déjà glissée dans notre quotidien. On lui doit la miniaturisation des disques durs à la fin des années 1990, puis l'essor des mémoires flash, et en filigrane l'avènement des smartphones. Elle s'apprête désormais à passer la vitesse supérieure. En janvier 2024, la France a lancé un Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) consacré à la spintronique. Piloté par le CEA et le CNRS dans le cadre de France 2030, il mobilise plus de 38 millions d'euros sur huit ans. L'objectif est clair : transformer des avancées scientifiques en technologies utilisables à grande échelle. Avec, à la clé, un atout décisif à l'heure de l'explosion des usages numériques : une électronique capable de faire mieux en consommant ▶

10^{-8} seconde
La vitesse d'écriture sur une mémoire magnétique.

10^{6}
fois moins d'énergie pour écrire un bit qu'en électronique classique.

▲ **Illustration d'une cellule de mémoire magnétique (MRAM),** élément de base de la spintronique. Elle cumule de nombreuses qualités : endurance, vitesse ultrarapide, sobriété énergétique.

beaucoup moins d'énergie. Si l'électronique s'est bâtie autour de la capacité à manipuler l'électron grâce à sa charge électrique, la spintronique, elle, exploite son spin. *« Le spin est une propriété quantique de l'électron,* résume Lucian Prejbeanu, directeur du laboratoire Spintec (CEA-CNRS-université Grenoble Alpes), l'un des centres français de référence en spintronique. *On peut se le représenter comme une sorte de petit aimant associé à chaque électron, et qui peut prendre deux orientations principales, vers le "haut" ou vers le "bas". Tout découle de ça…* »

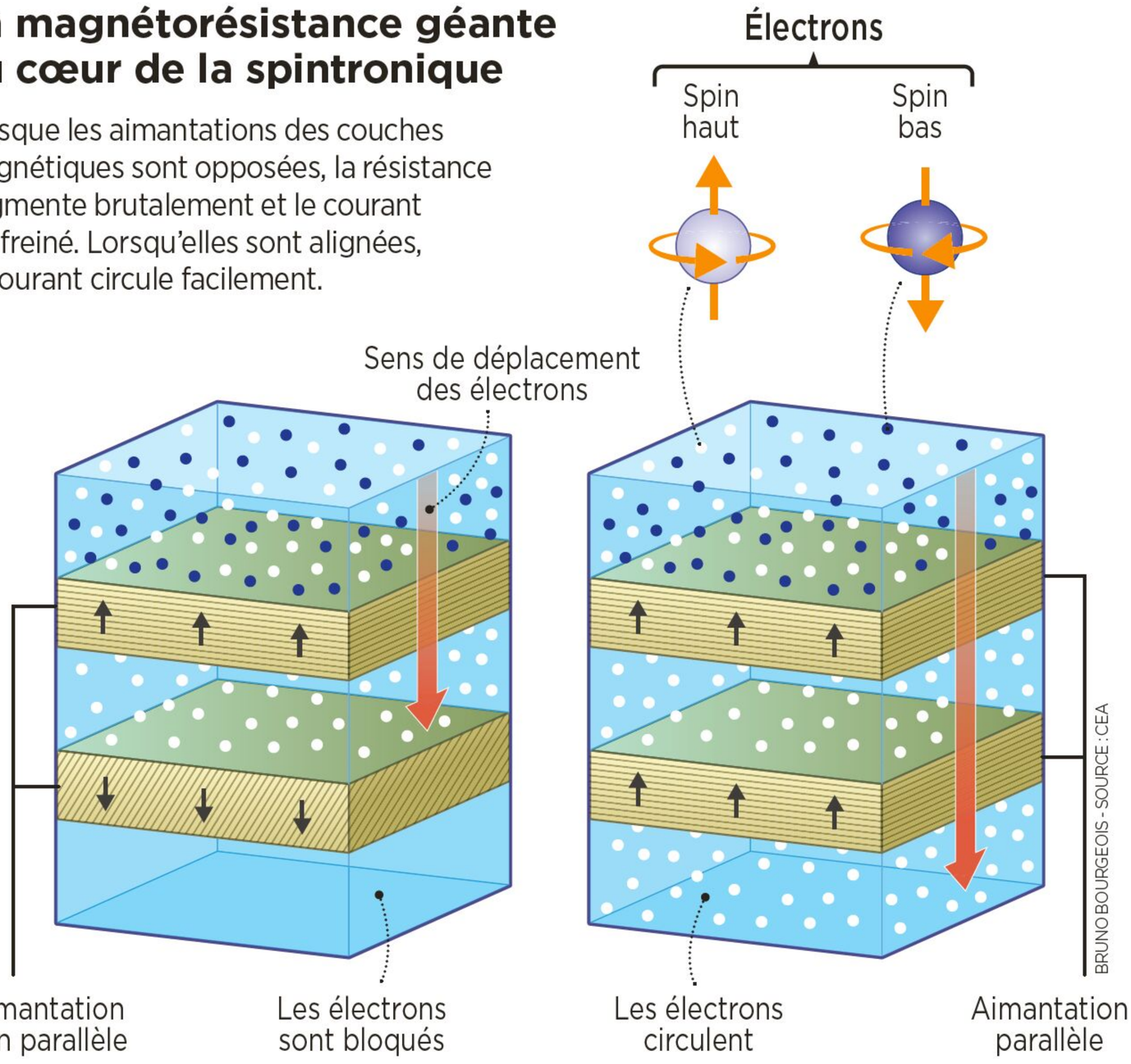
Objectif : réduire fortement la résistance électrique

L'acte fondateur de la spintronique remonte à 1988, avec la découverte de la magnétorésistance géante par Albert Fert *(lire l'encadré ci-dessous)* et Peter Grünberg, tous deux récompensés du prix Nobel de physique en 2007. Quand on empile les couches magnétiques ultrafines, le courant électrique dépend fortement de l'orientation du spin des électrons en mouvement par rapport à l'aimantation des couches qu'ils traversent. Chaque couche magnétique possède en effet une aimantation bien définie, correspondant à l'alignement des spins des électrons du matériau qui la compose. La trajectoire des électrons qui traversent l'empilement dépend alors de l'orientation de leur spin par rapport à cette aimantation. Lorsque les aimantations des deux couches sont orientées dans le même sens, les électrons dont le spin est parallèle à l'aimantation rencontrent peu d'obstacles : ils se propagent facilement à travers l'ensemble et la résistance au courant reste faible. En revanche, lorsque les aimantations sont opposées, ces mêmes électrons, bien transmis dans la première couche, voient leur trajectoire fortement perturbée dans la seconde : ils y passent beaucoup moins bien, ce qui augmente fortement la résistance électrique *(voir le schéma ci-dessus)*. D'où le nom de magnétorésistance géante.

L'écart de résistance entre les deux configurations devient alors très important, ce qui permet de détecter des variations d'aimantation extrêmement fines à la surface des disques. *« Cette sensibilité a permis d'augmenter considérablement la densité des disques durs,* explique Lucian Prejbeanu. *On a pu lire des bits (unité élémentaire d'information pouvant prendre la valeur 0 ou 1) beaucoup plus petits parce que la variation de résistance entre les deux états était suffisamment grande pour être*

La magnétorésistance géante au cœur de la spintronique

Lorsque les aimantations des couches magnétiques sont opposées, la résistance augmente brutalement et le courant est freiné. Lorsqu'elles sont alignées, le courant circule facilement.



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : CEA

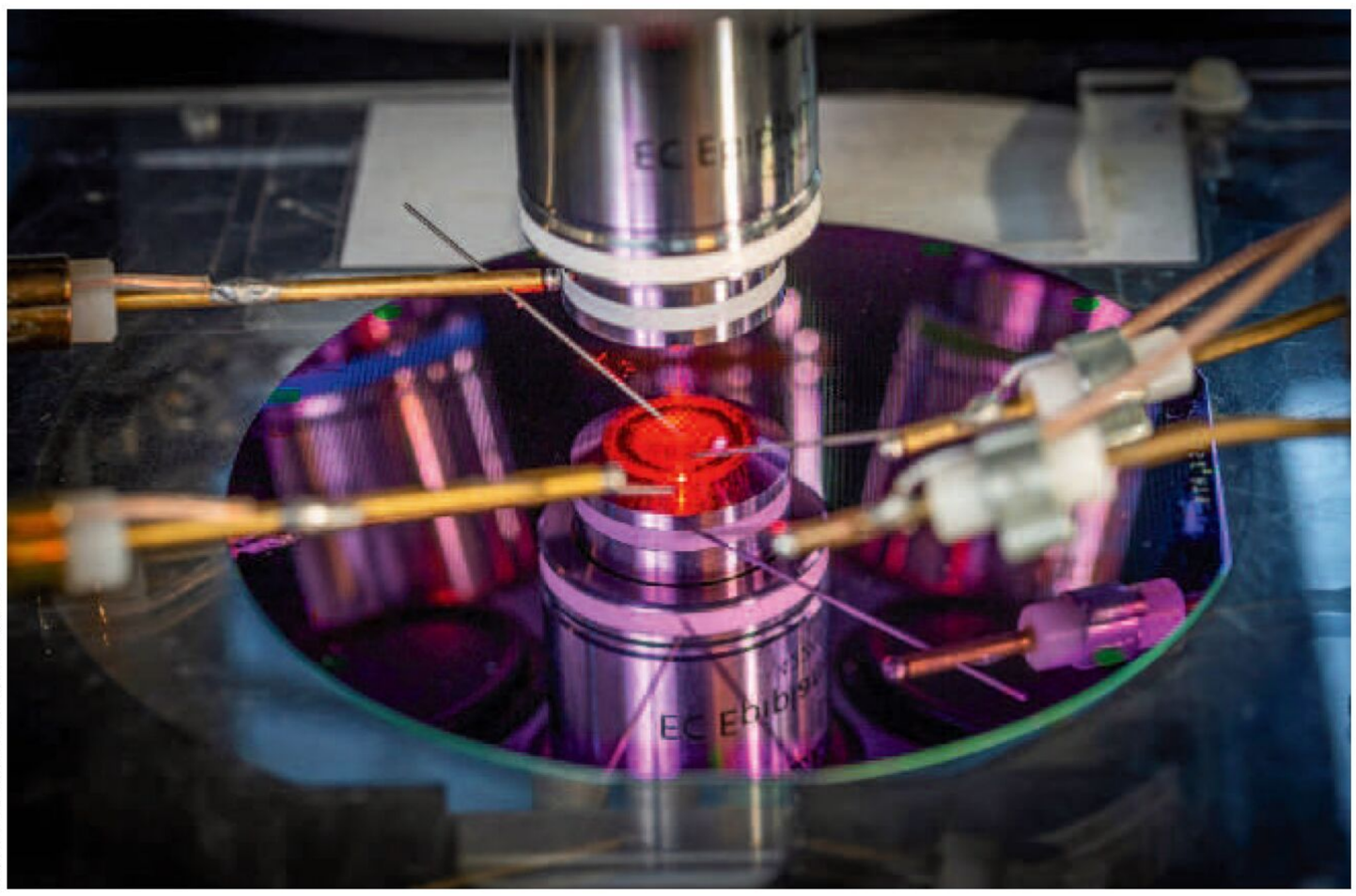
DÉCOUVERTE

Albert Fert, un prix Nobel à l'origine de la spintronique

J. AYISSI / AFP

Né en 1938 à Carcassonne, ancien élève de l'École normale supérieure, Albert Fert s'est intéressé dès sa thèse, à la fin des années 1960, au mouvement des électrons dans les métaux ferromagnétiques. En vérifiant expérimentalement une hypothèse formulée dans les années 1930 par le physicien britannique Neville Mott, il montre que la mobilité des électrons dépend de l'orientation de leur spin par rapport à l'aimantation du matériau. Ce résultat ouvre la voie à une nouvelle manière de penser le transport électrique. Vingt ans plus tard, en 1988, cette intuition trouve une concrétisation avec la découverte de la magnétorésistance géante, mise en évidence presque simultanément avec Peter Grünberg. L'effet est rapidement exploité dans les têtes de lecture des disques durs, permettant de multiplier leur capacité en quelques années. Rarement une découverte de science fondamentale aura si vite débouché sur des applications aussi majeures. Fert et Grünberg sont récompensés par le prix Nobel de physique en 2007.

MARGAUX MONVOISIN



C. MOREL / SPINTEC / CNRS IMAGES

Le Spinfab au CEA de Grenoble permet d'observer des domaines magnétiques au microscope pour étudier l'écriture ultrarapide en spintronique.

détectée. C'est cette avancée qui a rendu possible l'explosion du stockage grand public depuis les années 1990-2000. » Mais à ce stade, la spintronique se limite encore à lire l'information, l'écriture continuant de se faire de manière classique. Écrire est plus compliqué, mais nous y sommes. C'est l'un des axes majeurs explorés à Spinfab, avec les mémoires magnétiques, ou MRAM. Concrètement, l'information est stockée dans une cellule élémentaire, au cœur de chaque mémoire MRAM. *« À l'échelle nanométrique, cette cellule prend la forme d'un pilier, obtenu en gravant verticalement l'empilement de couches magnétiques,* explique Ricardo Sousa, chercheur à Spintec. *Dans ce pilier, les deux couches magnétiques sont séparées par une barrière isolante extrêmement fine. L'une des couches sert de référence, avec un sens d'aimantation fixé. L'autre est libre et peut changer d'orientation. L'écriture consiste à modifier l'orientation magnétique de cette couche libre à l'aide d'un courant électrique dont les électrons, par leur spin, exercent une action directe sur l'aimantation.* » L'orientation de la couche détermine si le bit vaut « 0 » ou « 1 ». Côté performances, les MRAM promettent un saut considérable. Là où un disque dur travaille à l'échelle de la milliseconde, freiné par la mécanique de plateaux en rotation, et où les mémoires flash opèrent en microsecondes, la MRAM vise des temps d'écriture de quelques dizaines de nanosecondes. Autrement dit, elle se rapproche des vitesses des mémoires vives, tout en conservant l'information lorsque l'alimentation est coupée. À cela s'ajoute une endurance bien supérieure à celle des mémoires flash, capables de supporter un nombre limité de cycles d'écriture. Les cellules MRAM peuvent, elles, être écrites et réécrites des millions de milliards de fois, sans dégradation notable.

La MRAM n'est pas une promesse lointaine : elle est déjà utilisée dans des équipements industriels, des automobiles ou des systèmes spatiaux, où l'on privilégie la fiabilité à la capacité de stockage. Les mémoires magnétiques actuelles offrent en effet des capacités modestes en comparaison des stockages plus classiques, de l'ordre de quelques mégaoctets à quelques dizaines de mégaoctets.

Mais la plus spectaculaire qualité des MRAM, c'est leur sobriété énergétique. Une caractéristique majeure de la spintronique. Cette technologie est économe en énergie car l'information est écrite en réorientant des aimantations sans déplacer de grandes quantités de charges électriques. *« L'énergie nécessaire pour modifier l'orientation d'un spin est des dizaines de milliers à un million de fois plus faible que celle requise pour écrire dans des mémoires classiques à base de semi-conducteurs,* souligne Lucian Prejbeanu. *Il faut aussi regarder ce que l'on dissipe par effet Joule. Lorsque l'on fait circuler des courants électriques dans l'électronique classique, une partie de l'énergie est inévitablement perdue sous forme de chaleur. La spintronique joue sur les deux tableaux.* »

Une nouvelle voie avec la ferroélectricité

Pour l'instant, il n'a été question que de lecture et d'écriture de données, mais la spintronique s'intéresse aussi au traitement des données. Un exemple : la start-up Nellow, fondée en 2024 par des chercheurs de Spintec et du laboratoire Albert-Fert (CNRS-Thales-université Paris-Saclay), dont Manuel Bibes, lauréat en 2025 de la médaille d'argent du CNRS. Elle explore une voie qui combine la spintronique à une autre propriété de la matière : la ferroélectricité. *« C'est l'équivalent du magnétisme, mais avec une polarisation électrique,* résume Laurent Vila, directeur technique de la start-up. *Là où l'aimantation correspond à l'orientation de minuscules aimants, la polarisation électrique traduit une séparation nette entre les charges positives et les charges négatives dans le matériau.* » Comme

MORE MAGAZINES: XSAVA.XYZ

l'aimantation, elle est non volatile ; mais, à la différence des dispositifs classiques, elle peut être inversée par l'application d'une simple tension électrique, sans faire circuler de courant. *« On commute l'état en chargeant ou en déchargeant un condensateur, avec des pertes énergétiques extrêmement faibles »*, précise Laurent Vila. Cette propriété change la fonction même du composant. Là où la MRAM permet avant tout de stocker l'information, l'introduction de la ferroélectricité ouvre la voie à des dispositifs capables de participer directement au calcul. Nellow a ainsi développé un composant hybride, baptisé FESO (Ferroelectric spin-orbit), qui intègre mémoire et logique dans une même brique. *« L'idée est de faire en sorte que le calcul se fasse là où l'information est stockée,* explique Julien Bréhin, chercheur à Spintec. *En limitant drastiquement les échanges internes, cette approche vise des applications très concrètes.* » Dans un téléphone portable, par exemple, elle pourrait permettre de traiter certaines tâches — reconnaissance de gestes, de voix ou d'images — avec une consommation bien plus faible, prolongeant l'autonomie de la batterie. Dans des objets connectés ou des capteurs intelligents, capables de fonctionner en continu, elle ouvrirait la voie à des dispositifs autonomes, traitant localement l'information sans la transmettre en permanence vers un serveur distant.

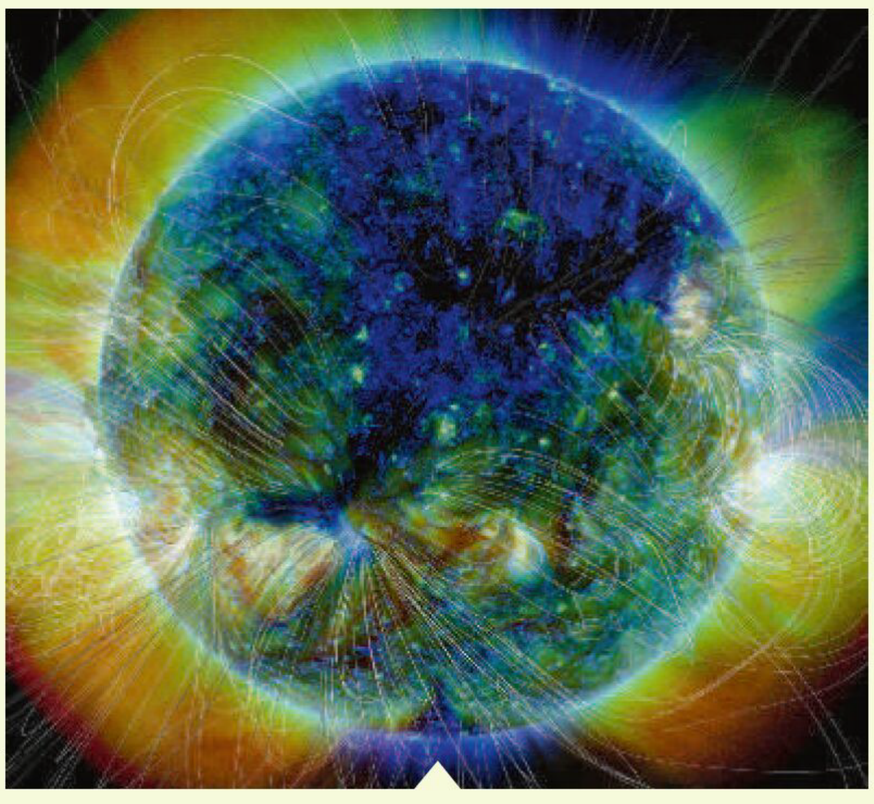
S'inspirer du fonctionnement du cerveau

Mais les bouleversements promis par la spintronique vont encore plus loin. En rapprochant mémoire et calcul au sein d'un même composant, des travaux encore exploratoires ne cherchent plus à optimiser l'électronique existante, mais carrément à changer de modèle de calcul. L'idée est de s'inspirer du fonctionnement du cerveau, capable de traiter des informations complexes avec une consommation énergétique d'environ 20 watts. C'est l'objectif du projet Hobbit, mené à Spintec par Philippe Talatchian. Dans ces architectures dites neuromorphiques, l'information n'est plus traitée par un processeur central qui va sans cesse chercher des données en mémoire. Chaque élément joue un double rôle : il stocke un état et participe activement au traitement de l'information, à la manière d'une synapse artificielle. L'objectif : concevoir des systèmes capables de faire juste ce qu'il faut, quand il le faut, avec une dépense énergétique minimale. Une piste particulièrement prometteuse pour l'intelligence artificielle embarquée et, plus largement, pour une électronique enfin réconciliée avec la sobriété. ■

MESURES

Des capteurs spintroniques à l'écoute des champs les plus faibles

La spintronique ouvre la voie à une nouvelle génération de capteurs magnétiques à la fois ultrasensibles pour être embarqués sur des satellites. L'enjeu est de détecter des champs extrêmement faibles, jusqu'au picotesla (10^{-12} tesla). Cela permettrait de cartographier avec une finesse inédite le champ magnétique terrestre, un outil précieux pour l'étude de la structure interne de la planète. Ils intéressent aussi la physique spatiale, pour analyser les interactions entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre, un phénomène clé pour comprendre les tempêtes géomagnétiques susceptibles d'affecter les satellites et les réseaux électriques au sol. Au laboratoire Spintec de Grenoble, l'équipe d'Hélène Béa développe ainsi des capteurs reposant sur des dispositifs proches dans leur principe de ceux utilisés dans les MRAM. *« La différence, c'est que la couche dite libre n'a plus deux états stables possibles, mais elle peut tourner continûment sous l'effet d'un champ magnétique. Cette rotation se traduit par une variation linéaire de résistance, qui permet de mesurer précisément l'intensité du champ appliqué »*, explique-t-elle. Plus compacts, moins gourmands en énergie, ces capteurs spintroniques ont les qualités idéales pour équiper des satellites scientifiques.



SPL/SUCRÉ SALÉ

Zone sombre à la surface du Soleil où le champ magnétique s'ouvre et libère des vents solaires vers la Terre. Ces structures illustrent l'importance de la mesure fine des champs magnétiques.

Sophie Adenot, cobaye de l'espace

Os fragilisés, cœur désadapté, microbes envahissants : les expériences que l'astronaute va mener dans l'ISS visent à comprendre ces transformations et à développer des solutions, indispensables aux futures missions lointaines… et utiles aux déserts médicaux terrestres.

SPACEX

À 43 ans, l'astronaute qui a décollé le 13 février de Cap Canaveral, en Floride (États-Unis), est la deuxième Française, après Claudie Haigneré, à effectuer un vol spatial.

Au cours des huit à neuf mois qu'elle passera à bord de la Station spatiale internationale (ISS), l'astronaute française Sophie Adenot participera à environ 200 expériences internationales. Sept d'entre elles seront suivies par le Cadmos (Centre d'aide au développement des activités en micropesanteur et des opérations spatiales), un service du Cnes à Toulouse. La plupart seront consacrées à la santé de l'astronaute et à la salubrité de son habitat, à l'heure où la mission concomitante Artemis II annonce un retour sur la Lune préparatoire à une mission vers Mars dans les prochaines décennies (*lire* S. et A. *n° 948*).

La première expérience, Echo-Bones, sera réalisée en réalité avant le départ de l'astronaute et après son retour. Il s'agit en effet d'analyser la perte osseuse liée à la mission. En microgravité, les os ne sont plus sollicités comme sur Terre. Résultat : ils perdent environ 1 % de leur masse chaque mois, un phénomène comparable à certaines formes d'ostéoporose. Jusqu'aujourd'hui, l'effet des vols spatiaux sur l'os était étudié par des techniques utilisant des rayons X. Développée par le CHU d'Angers, l'Inserm et l'université de Delft (Pays-Bas), cette nouvelle expérience utilise cette fois l'échographie. Des images du tibia de Sophie Adenot ont d'ores et déjà été réalisées. Elles permettront des comparaisons avec les échographies d'après-mission pour mesurer

le rythme de récupération. L'échographie permet d'évaluer la densité osseuse et également — c'est la nouveauté — le flux sanguin au sein de l'os. À terme, cette technique d'imagerie pourrait trouver sa place dans les futures missions spatiales.

Rendre l'astronaute plus autonome pour se soigner

Dans cette perspective, les chercheurs s'attachent aussi à rendre l'astronaute plus autonome pour se soigner. Car dans l'espace, plus la distance grandit, plus le temps de latence s'allonge. Si aujourd'hui certaines échographies réalisées à bord de l'ISS peuvent encore être téléopérées depuis la Terre, ce ne sera plus possible lors des missions d'exploration vers la Lune ou Mars. Conçue par des chercheurs du CHU de Caen et le Medes à Toulouse, l'expérience EchoFinder vise à permettre à des astronautes non spécialistes de réaliser eux-mêmes cet exercice, grâce à la réalité augmentée et l'intelligence artificielle. *« Nous avons, au préalable, enregistré la localisation des organes dans le corps de Sophie Adenot,* explique Jérôme Daniel, responsable du développement de l'expérience au Cadmos. *À cette occasion, la position de la sonde au moment de la prise de l'image de l'organe a été sauvegardée.* » À bord de la station, deux personnes joueront le rôle de l'opérateur et du patient. Le premier devra, grâce au logiciel de réalité augmentée, essayer de retrouver l'organe sur l'écran de contrôle. *« À l'instar d'un jeu vidéo où le joystick serait la sonde, il devra remettre des sphères bleues dans des cubes jaunes pour trouver, en théorie, la bonne position,* poursuit Jérôme Daniel. *Dès que l'algorithme d'IA détecte un organe, il déclenche automatiquement la prise d'images. Mais en réalité, les organes en apesanteur bougent ou changent de forme, certains plus que d'autres. C'est ce que nous voulons quantifier, pour l'intégrer au protocole.* » Cette nouvelle technologie ouvre aussi des perspectives pour la médecine en mer, dans les zones isolées ou les déserts médicaux. *« Il y a aujourd'hui un vrai enjeu sociétal à rendre l'échographie accessible à tous,* souligne Amir Hodzic, médecin-chercheur à l'université et au CHU de Caen. *Mais l'une des difficultés consiste à obtenir une acquisition de qualité. C'est dans cette perspective que nous avons pensé ce protocole.* »

COMPTE X DE SOPHIE ADENOT

La structure osseuse du tibia de l'astronaute a été mesurée avant son départ, et le sera à nouveau à son retour, afin de comprendre les pertes osseuses liées à l'apesanteur.

Autre expérience majeure de la mission, PhysioTool, qui vise à suivre sur 24 heures l'adaptation du corps humain à la microgravité, une recherche essentielle pour préparer de futurs vols interplanétaires. Coordonnée, entre autres, par le CHU d'Angers et l'université de Lorraine, l'expérience repose sur des capteurs physiologiques synchronisés, capables de mesurer simultanément la fréquence cardiaque, la pression artérielle, l'oxygénation du sang, la respiration, la température, l'activité musculaire ou encore la qualité du sommeil.

Dans un espace confiné, les bactéries sont à la fête

Dans ce domaine, les multiples connaissances et développements engrangés depuis 1996 et le premier vol de Claudie Haigneré permettent de disposer d'un système de mesures en mode ambulatoire. Cela permettra, par exemple, d'étudier l'adaptation du système cardiovasculaire aux conditions spatiales. *« Sur Terre, ce système est en permanence sti-*

ÉQUIPEMENT

EuroSuit, une combinaison spatiale européenne

Sophie Adenot testera un prototype de combinaison développé par Spartan Space et Decathlon. Eurosuit est destiné à protéger l'astronaute lors des phases de lancement ou d'atterrissage tout en restant confortable, rapide à enfiler et compatible avec les mouvements de manipulation d'objets. *« Nous voulons faire des tests de pression, de résistance au feu, etc.*, indique Gregory Navarro, responsable du développement d'Eurosuit au Cnes. *L'objectif, pour Sophie Adenot, est de pouvoir enfiler la combinaison en moins de deux minutes*. » Le prototype embarqué — non pressurisé — bénéficie d'une expertise développée pour le sport de haut niveau. *« Nous ne voulons pas qualifier une combinaison opérationnelle,* précise Thibault Pouget, chef du projet chez Spartan Space, *mais valider un concept et se préparer pour une future capsule habitée européenne.* »

CNES/OLLIER ALEXANDRE, 2025

L'expérience EchoFinder, testée ici par Sophie Adenot à Toulouse, a pour but de permettre à un astronaute de réaliser des échographies médicales en autonomie.

mulé par la gravité, dès le matin lorsqu'on se lève et lorsqu'on marche, explique Marc-Antoine Custaud, professeur de physiologie à l'université d'Angers. *Toute notre activité physique consiste à contrer la gravité. Dans un environnement spatial, le système cardio-vasculaire s'inactive, ce qui a des conséquences sur les vaisseaux, le cœur, la pression artérielle.* » Les astronautes peinent alors à fournir un effort physique et connaissent un risque accru de syncope. À leur retour sur Terre, le reconditionnement n'est pas immédiat et des pertes de connaissance peuvent survenir, lorsque le cerveau est temporairement moins bien irrigué, notamment en position verticale.

« *Cette expérience est également intéressante d'un point de vue cognitif,* ajoute Benoît Belmont, de l'université de Lorraine. *Nous voulons réaliser une mesure intégrative entre des paramètres physiologiques, psychologiques et comportementaux, afin de pouvoir identifier leurs relations dans cet environnement inédit.* » Dans un environnement spatial, l'altération des fonctions corporelles peut influencer l'attention, la prise de décision ou la fatigue mentale. Cela aura forcément des conséquences lors de futures missions de longue durée.

Autre problème : la propreté. Dans un milieu confiné et habité en continu, les micro-organismes sont à la fête. Bactéries, champignons et biofilms peuvent affecter la santé des astronautes et endommager des équipements critiques. Dès les années 1980, les Soviétiques puis les Russes ont observé, dans la station Mir, le développement de micro-organismes capables d'attaquer des câbles électriques, des systèmes de survie, voire des hublots. Sur l'ISS, le grand ménage est obligatoire chaque samedi. Mais un laboratoire truffé de câbles, tuyaux et équipements électroniques garde des zones inaccessibles. « *Aujourd'hui, les astronautes demeurent longtemps dans l'espace,* souligne Laurence Lemelle, microbiologiste à l'École normale supérieure de Lyon. *La problématique de la biocontamination, qui peut affecter la physiologie des astronautes, est donc un sujet de préoccupation très important.* » Pour détecter ces invisibles menaces, la start-up française Lumetis, en partenariat avec l'équipementier toulousain Comat, a développé MultISS, un imageur, qui « *éclaire les surfaces avec différentes longueurs d'onde — dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge,* précise Romain Hernandez, ingénieur en optique chez Lumetis. *Leur action combinée trahit, par fluorescence ou réflectance des matériaux, la présence de biofilms bactériens ou de moisissures invisibles à l'œil nu.* » Sophie Adenot disposera également quatre boîtiers de l'expérience MatISS dans le module européen Columbus. En leur sein, des capteurs piégeront les bioaérosols. « *L'objectif est de comprendre comment les bactéries interagissent avec différentes surfaces traitées* », note Laurence Lemelle. Certaines de ces surfaces sont conçues pour repousser les bactéries, d'autres pour inhiber leur croissance ou encore les attirer afin de former un biofilm protecteur. Toutes ces expériences participent d'une réflexion globale sur les missions spatiales futures, notamment vers Mars, où toute assistance depuis la Terre sera impossible. ■

Sylvie Rouat

EXPÉRIENCE ÉDUCATIVE

Faire pousser des plantes… et des vocations

Peut-on faire pousser des plantes sans gravité ? Comment la lumière influence-t-elle leur croissance quand le haut et le bas n'existent plus ? C'est à ces questions que devra répondre l'expérience ChlorISS, conçue dans un but à la fois scientifique et éducatif. À bord de l'ISS, Sophie Adenot fera germer pendant dix jours deux types de graines : l'arabette des dames, plante modèle utilisée en recherche, et la mizuna, moutarde japonaise. En parallèle, 4500 établissements scolaires, du primaire au lycée, mèneront la même expérience en classe. Les cinq premiers jours, la lumière n'éclairera les plantes que d'un seul côté et les cinq suivants, de l'autre côté. L'objectif est d'observer comment les végétaux s'orientent et poussent selon la lumière, sur Terre et en orbite, en comparant leurs résultats avec ceux obtenus par l'astronaute.

GETTY IMAGES

Le phénomène lumineux, jadis observé dans les cimetières et aujourd'hui rarissime, est une réaction chimique entre des gaz issus de la décomposition des corps et l'air (illustration).

Les feux follets traqués par la science

Une expérience originale a permis de générer des micro-éclairs lumineux qui pourraient expliquer ce phénomène de petites flammèches bleues souvent citées dans la littérature mais rarement observées dans la nature.

Le phénomène est aujourd'hui rarissime. Mais, jadis, en déambulant à la nuit tombée dans les allées des cimetières, il arrivait de surprendre au-dessus des tombes de petites flammèches bleues, qui virevoltaient quelques minutes dans l'air moite avant de s'évanouir. Durant des siècles et sous toutes les latitudes, ces derviches lumineux se sont donnés en spectacle. Des textes chinois les mentionnent dès le XIII^e^ siècle. Shakespeare les convoque dans *Henri IV*, Goethe dans *Faust*, tout comme Lewis Carroll, Charlotte Brontë, ou bien encore J. R. R. Tolkien dans *Le Seigneur des anneaux*. Âmes en peine cherchant le repos, esprits malins espérant attirer les vivants dans leurs sabbats nocturnes ou enfants morts sans baptême, ces fantômes évanescents ont été de toutes les superstitions. Qu'ils veuillent avertir d'un funeste destin ou indiquer l'emplacement d'un trésor, les feux follets ont enflammé les imaginations.

Aujourd'hui, la science cherche une explication rationnelle à ces manifestations lumineuses. On sait depuis longtemps que *« les feux follets sont causés par l'inflammation du méthane issu de la dégradation de matière organique par des archées, des organismes anaérobies »*, explique François Baudin, professeur à Sorbonne Université, à Paris. Mais le mécanisme exact restait à découvrir. Tout récemment, une recherche menée par Richard Zare, de l'université Stanford, aux États-Unis, a proposé une nouvelle explication dans une étude publiée dans les *Pnas*. Des microbulles d'air et de méthane ont été injectées par les chercheurs dans un générateur de leur conception. Lorsque la densité des microbulles atteignait une certaine concentration, des micro-éclairs lumineux se formaient à l'interface, signe d'une oxy-

dation du méthane sans dégagement perceptible de chaleur. Richard Zare estime que leurs observations sont cohérentes avec le phénomène des feux follets. *« Notre dispositif a montré qu'ils étaient causés par de petites décharges électriques spontanées entre des gouttelettes d'eau chargées de manière opposée. C'est pour cette raison que vous n'en avez pas dans des régions arides. Le processus nécessite un environnement humide. »* Pour autant, le chercheur avoue n'avoir *« personnellement jamais été témoin de feux follets »*.

Une utilité pour comprendre les briques élémentaires du vivant

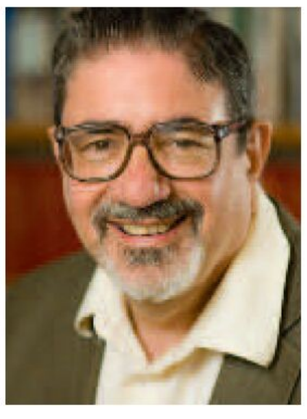
François Baudin, lui, pense en avoir aperçu une fois dans une zone marécageuse, mais sans certitude. Si les feux follets ont disparu, c'est que les marécages et les zones humides ont été drainés. S'ils ne dansent plus au-dessus des tombes, c'est que les défunts reposent aujourd'hui dans des cercueils hermétiques là où, les siècles précédents, ils pouvaient être inhumés à même la terre, enveloppés dans de simples linceuls, permettant ainsi aux gaz issus de la décomposition organique de s'échapper.

Mais sont-ce des raisons suffisantes ? Antonio Carlos Pavão du département de chimie fondamentale, à l'université fédérale de Pernambouc, au Brésil, n'en est pas convaincu. *« Les auteurs de l'étude proposent une théorie expérimentale séduisante qui rejoint celle proposée en 1776 par Alessandro Volta et selon laquelle ces manifestations résulteraient de l'interaction entre de l'électricité et l'air inflammable. Mais, elle ne répond pas à une question essentielle : pourquoi ont-ils disparu ? »* Pour le chercheur, l'explication à ce mystère résiderait dans le caractère non spontané du phénomène qui nécessiterait une étincelle pour s'amorcer. *« Par le passé, les promeneurs étaient munis de lanternes et de torches pour se guider la nuit. Avec mon équipe, nous pensons que si ces phénomènes se sont raréfiés, c'est, en plus du drainage des marécages et d'une pollution lumineuse ambiante empêchant de les voir, à cause des lampes électriques qui n'enflamment plus le méthane. »*

Si les feux follets se font aujourd'hui désirer, les micro-éclairs générés par Richard Zare pourraient trouver leur utilité ailleurs, en prébiotique. *« Nous allons poursuivre nos travaux en nous concentrant sur la création des briques élémentaires du vivant. Nous avons ainsi montré dans un article publié en mars 2025 dans* Science *que tous les composés synthétisés dans la célèbre expérience de Miller de 1953 sur une origine chimique de l'apparition de la vie sur Terre pourraient être produits à partir de réactions et d'émissions de luminescence entre des microgouttelettes d'eau baignant dans un mélange gazeux primitif constitué d'azote, de méthane et d'ammoniac. »*

Les feux follets ne sont pas morts. Ils pourraient même contribuer à répondre à l'une des plus grandes énigmes qui soit : comment est apparue la vie sur Terre ? ■

Hervé Ratel


STANFORD UNIVERSITY

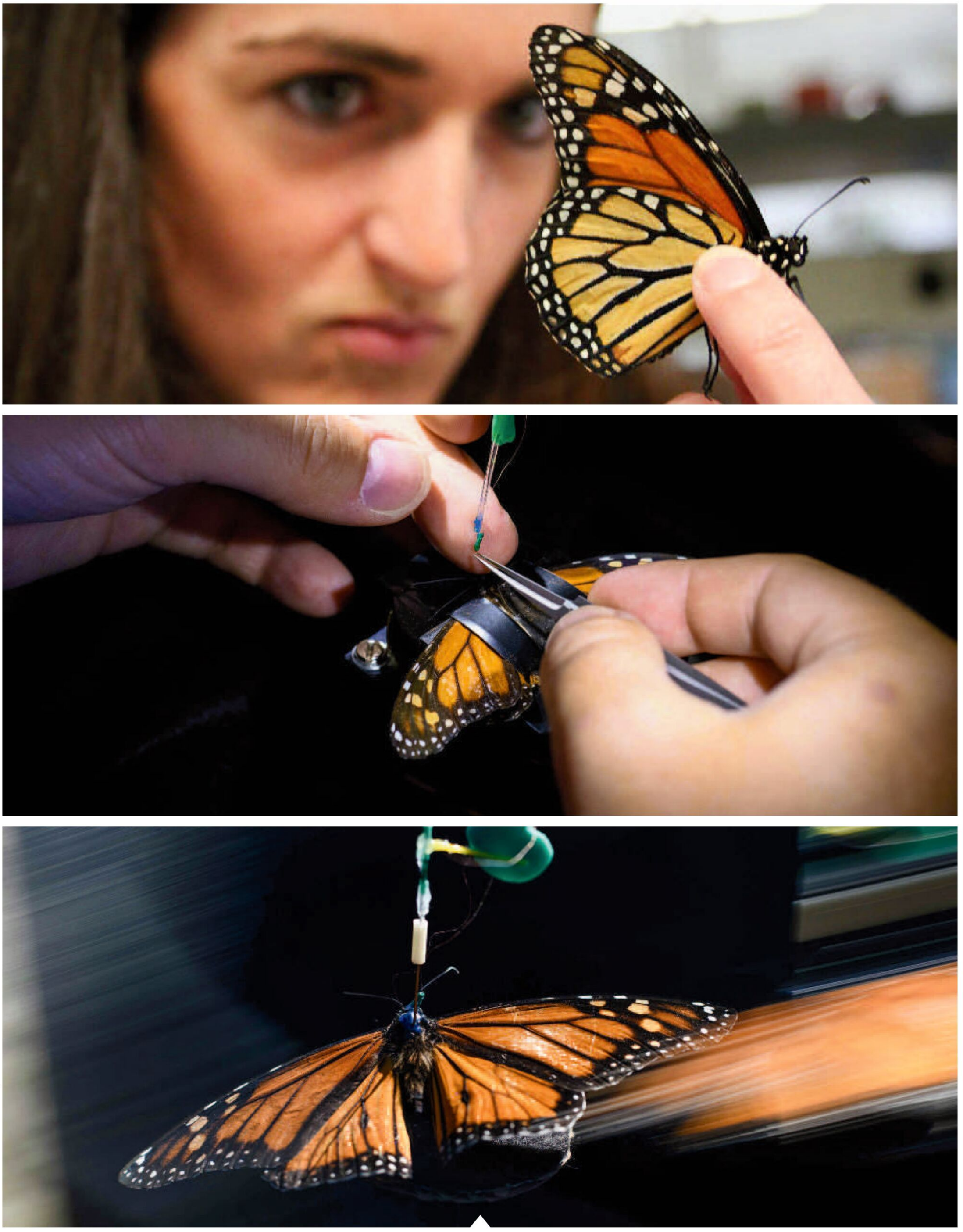
« Notre dispositif a montré qu'ils étaient causés par des décharges électriques entre des gouttelettes d'eau chargées de manière opposée »

Richard Zare, professeur de chimie à l'université Stanford, aux États-Unis

ÉNIGMES

Foudre en boule, feux de Saint-Elme et farfadets

La nature n'est pas avare en phénomènes lumineux. Certains ont trouvé leur explication. Les feux de Saint-Elme aux extrémités des mâts des navires sont causés par l'effet de couronne, une décharge électrique à proximité du mât qui se comporte comme un conducteur. Les farfadets, des éclairs en haute atmosphère, seraient également dus à un phénomène d'ionisation à proximité d'un gros nuage d'orage. D'autres conservent tout leur mystère. Les boules de feu des Nâgas, qui éclateraient dans le ciel en octobre au-dessus du fleuve Mékong, ont alimenté quantité de théories. Comme le résume Phramaha Somphog Unyo, du Collège international des études bouddhistes, en Thaïlande, en 2022, les croyants y voient le signe du Nâga, un grand serpent de la religion hindouiste. Les sceptiques, une intervention humaine d'artificiers plaisantins. Les scientifiques, la réaction de gaz accumulés à la surface de la rivière avec l'air ambiant. Autre énigme météorologique : la foudre en boule, une sphère lumineuse d'environ 20 cm de diamètre qui pénétrerait dans les foyers par la cheminée ou une fenêtre entrouverte les nuits d'orage, semant la panique. La plupart des hypothèses émises font appel à des boules de plasma, mais aucune n'est entièrement satisfaisante. Or, contrairement à Tintin dans *Les Sept Boules de cristal*, aucun chercheur n'en a vu en conditions réelles…



TEXAS A&M SCIENCE - MARK FELIX/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

Le papillon monarque parcourt jusqu'à 4000 km pour rejoindre le sud ou le nord, selon la saison. Il dispose dans ses antennes d'une protéine qui agit comme un capteur magnétique (ici les travaux de manipulation génétique de la chronobiologiste Christine Merlin).

Guidage magnétique

Le dernier mystère du peuple migrateur

Un grand nombre d'espèces migrantes — passereaux, papillons, saumons, baleines — utilisent le champ magnétique terrestre pour s'orienter. Des chercheurs de l'université de Munich, en Allemagne, ont mis au jour chez le pigeon biset l'organe responsable de ce sixième sens, l'oreille interne. Une avancée majeure pour comprendre ce mécanisme biologique.

Par Agnès Vernet

C'est le graal de la biologie, le sixième et dernier sens encore inexpliqué, un superpouvoir de géolocalisation : la capacité de sentir le champ magnétique. C'est aussi un sujet controversé. La science tourne autour depuis les travaux du Français Camille Viguier, qui, en 1882, publie un traité sur le sens de l'orientation et pressent l'existence d'une magnétoréception chez les animaux grands migrateurs. Depuis cette publication fondatrice, de nombreuses observations soutiennent l'hypothèse d'un sens magnétique de l'orientation. Et en 1965, le rouge-gorge *Erithacus rubecula* a apporté la première démonstration comportementale. Le passereau coloré est choisi comme modèle par Friedrich Wilhelm Merkel et Wolfgang Wiltschko, deux zoologistes de l'université de Francfort (Allemagne), car lorsqu'il vit en Europe centrale ou en Scandinavie, il migre de nuit vers le sud en hiver — les groupes d'Europe de l'Ouest ou du Sud étant, eux, sédentaires. Dans cette expérience, des oiseaux issus de groupes migrateurs étaient placés dans des cages circulaires individuelles, dont les parois étaient recouvertes de papier. En sautant pour s'envoler, les oiseaux égratignaient le papier et traçaient la direction qu'ils souhaitaient prendre. Il a ensuite suffi à Friedrich Wilhelm Merkel et Wolfgang Wiltschko de cacher le ciel, pour n'offrir aucun indice visuel aux oiseaux, et de générer un champ magnétique avec une autre orientation que le nord pour voir les oiseaux changer de direction. La démonstration était faite : les rouges-gorges ont une boussole interne.

Au cours des soixante dernières années, des expériences similaires ont été menées chez un grand nombre d'espèces migrantes. On sait désormais que les tortues de mer, les barges rousses — un super migrateur qui navigue entre l'Alaska et l'Australie —, mais aussi des papillons, des requins, les saumons, des baleines et un grand nombre de passereaux utilisent le champ magnétique terrestre pour s'orienter. Les observations et les expériences comportementales sont solides. Mais pour la science, les preuves indirectes ne suffisent pas. Il faut savoir comment ça marche…

« Il y a probablement plus d'un sens magnétique chez les animaux »

Michael Winklhofer, professeur à l'université d'Oldenbourg (Allemagne), spécialiste de la magnétoréception chez les passereaux

CARL VON OSSIETZKY UNIVERSITÄT OLDENBURG

Des cellules de l'oreille interne captent les différentes positions

Ce n'est qu'il y a quelques mois, en novembre 2025, qu'une équipe de l'université de Munich (Allemagne) a enfin avancé des éléments de preuve biologiques. Leur modèle : le pigeon biset (*Columba livia*), que l'humain a sélectionné depuis plus de 8500 ans pour ses compétences de navigation. On sait depuis 1971 qu'il utilise la magnétoréception grâce aux travaux de l'Américain William Keeton, qui a attaché de petits aimants sur le dos des oiseaux et documenté qu'ainsi lestés, ils peinaient à retrouver leur chemin. On connaît désormais l'organe responsable de ce sixième sens : l'oreille interne. Lorsque les animaux sont exposés à un champ magnétique plus fort que le champ terrestre, les neurones de l'oreille interne — ainsi que ceux d'une région du cerveau qui sert à intégrer les informations sensorielles — s'activent. Et si on les compare avec les cerveaux d'oiseaux pour lesquels on n'a pas allumé le générateur de champ, on voit que seules ces régions cérébrales répondent spécifiquement au champ magnétique.

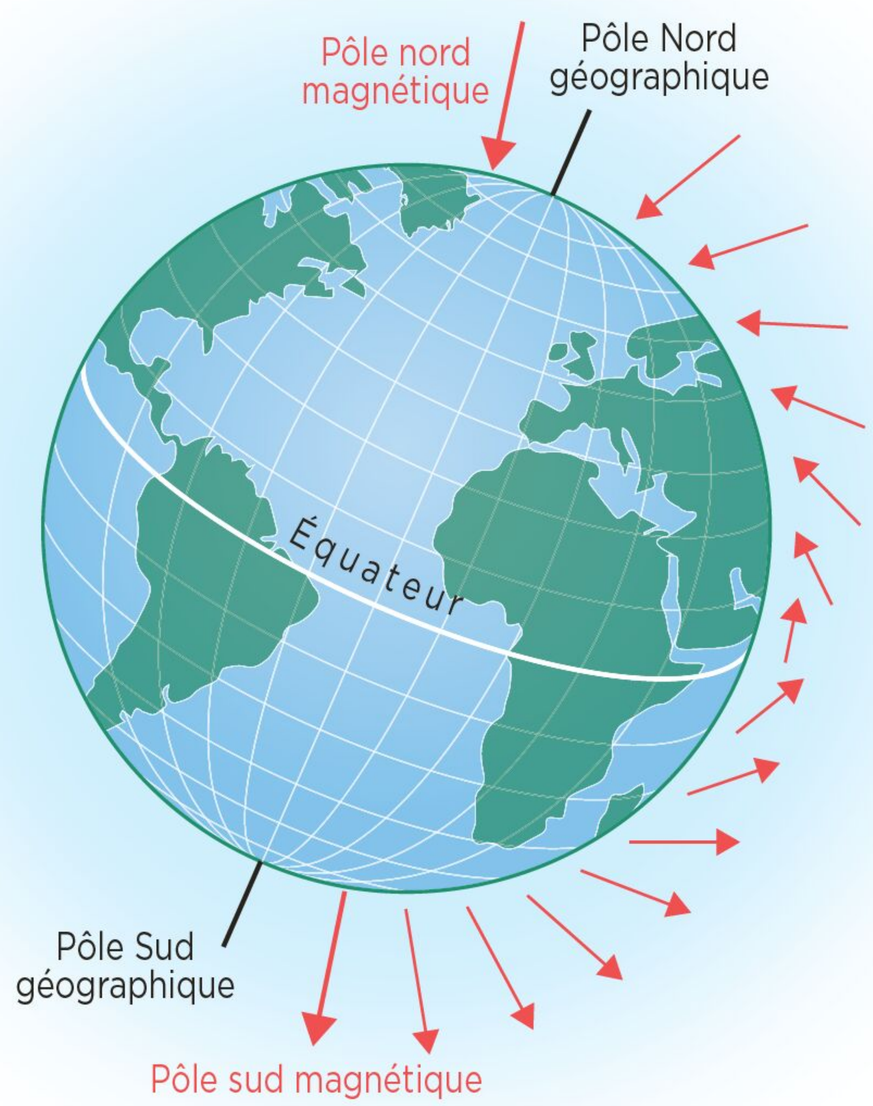
Selon les auteurs, cette réponse serait due aux cellules ciliées situées dans les canaux semi-circulaires, des canaux courbes de l'oreille interne connus pour leur fonction dans la perception de la position de la tête. Ici, des cellules capteraient la différence de champ le long du canal et transformeraient cette information en signal nerveux grâce à des canaux ioniques. Si on sait que des canaux ioniques susceptibles de réaliser cette transformation sont présents dans les cellules ciliées, il manque encore la preuve formelle qu'ils répondent au champ magnétique et amorcent un signal nerveux. « *Ces cellules sont tellement petites ! Il est impossible d'enregistrer leur activité spécifique* », se désespère David Keays, le neurobiologiste qui a dirigé ces travaux. Et comme il ne connaît aucun médicament qui bloquerait spécifiquement ce signal pour démontrer que les pigeons sont désorientés sans ces canaux, et que personne ne sait génétiquement modifier des pigeons, c'est l'impasse. La communauté scientifique ignore comment achever la démonstration.

D'autres mécanismes à l'œuvre dans la magnétoréception

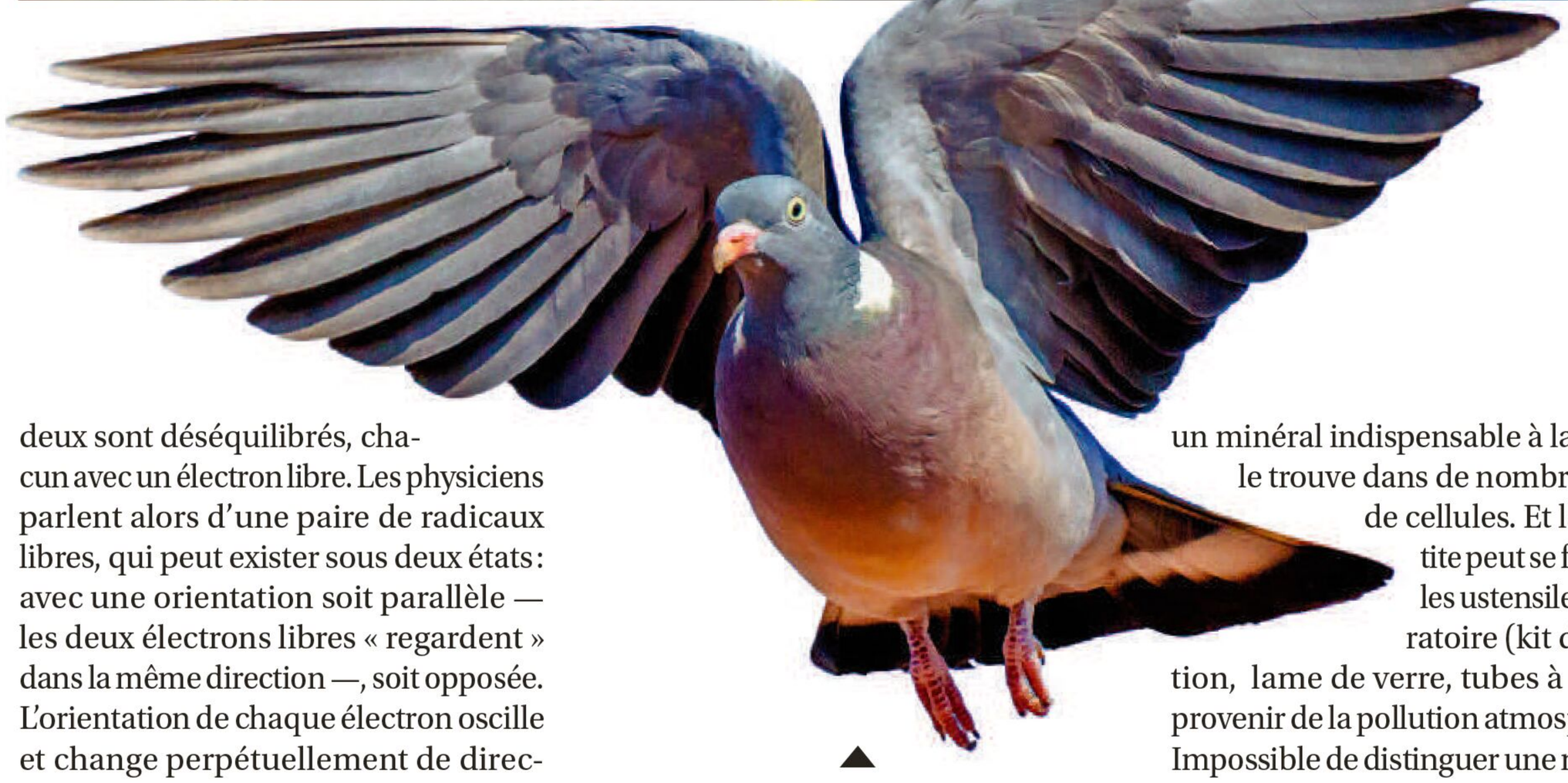
Le seul animal modèle de migration guidé par le champ magnétique chez qui on sait faire des manipulations génétiques est le papillon monarque, *Danaus plexippus*. Ce lépidoptère principalement américain est connu pour ses impressionnantes migrations : il parcourt jusqu'à 4000 km vers le nord au printemps pour passer l'été au Canada, avant de repartir vers le sud dès que les températures chutent afin de pondre dans des sapins de l'État de Michoacán, au Mexique. Pour réaliser cette prouesse, il dispose d'un sens magnétique aigu. Mais qui s'appuie sur un deuxième mécanisme, totalement différent de celui du pigeon. Il repose sur les propriétés quantiques d'une famille de protéines : les cryptochromes. Sous l'effet de la lumière bleue, un acide aminé perd un électron au profit de son voisin. Les

L'angle du champ magnétique varie du nord au sud

Tout autour de la Terre, le champ magnétique terrestre n'a pas la même inclinaison. Il est complètement vertical au niveau des pôles et tangent au niveau de l'équateur. En percevant cet angle et sa variation au fil des déplacements, des animaux comme les passereaux ou les papillons monarques savent s'ils volent vers le nord ou le sud.



BRUNO BOURGEOIS



Le pigeon biset possède un « sixième sens » pour s'orienter grâce au champ magnétique, tout comme les saumons et tortues de mer qui disposent d'une « carte mentale » pour retrouver leur lieu de naissance.

MARK FELIX/THE NEW YORK TIMES-JL. KLEIN & ML. HUBERT / NATURE PICTURE LIBRARY/AGENCY REDUX-REA

deux sont déséquilibrés, chacun avec un électron libre. Les physiciens parlent alors d'une paire de radicaux libres, qui peut exister sous deux états : avec une orientation soit parallèle — les deux électrons libres « regardent » dans la même direction —, soit opposée. L'orientation de chaque électron oscille et change perpétuellement de direction. Mais la proportion relative de ces deux formes dépend du champ magnétique. De nombreux auteurs supposent donc que les cryptochromes de la rétine sont les récepteurs de la magnétoréception de plusieurs espèces. D'ailleurs, l'équipe de Christine Merlin, de l'université A&M du Texas (États-Unis), a publié en 2021 une étude montrant comment des papillons monarques, dont avait été inactivée une catégorie de cryptochromes, perdaient leur sensibilité aux changements de champ magnétique. Pour percevoir le changement d'inclinaison de ce champ, les papillons ont donc besoin de leurs cryptochromes. Mais Christine Merlin ne crie pas victoire : *« Il est possible qu'ils ne soient que des intermédiaires indispensables pour transmettre le signal de changement de force magnétique et pas le récepteur. »*

Les cryptochromes sont aussi des candidats sérieux pour expliquer le sens magnétique des passereaux.

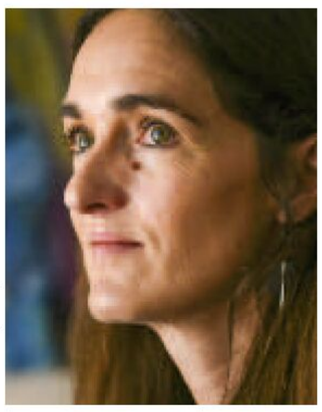
Troisième mécanisme possible : la présence d'une substance minérale, la magnétite, un oxyde de fer (Fe_3O_4), dans certains tissus biologiques. Celle-ci est composée de cristaux qui s'alignent avec l'orientation du champ magnétique terrestre. Plusieurs scientifiques ont suggéré que la magnétite puisse aussi aider des animaux à sentir le nord. Mais encore faut-il prouver son existence. Le fer est un minéral indispensable à la vie et on le trouve dans de nombreux types de cellules. Et la magnétite peut se former sur les ustensiles de laboratoire (kit de dissection, lame de verre, tubes à essai) ou provenir de la pollution atmosphérique. Impossible de distinguer une magnétite biologique d'une magnétite issue d'une contamination. Les travaux sur cette hypothèse sont dans l'impasse.

Plus l'oreille est petite, moins elle est sensible

« Il y a probablement plus d'un sens magnétique », reconnaît Michael Winklhofer, professeur à l'université d'Oldenbourg (Allemagne), spécialiste de la magnétoréception chez les passereaux. Et plusieurs mécanismes. La solution de l'oreille interne fonctionne chez des animaux comme le pigeon et les tortues, mais chez de plus petits oiseaux ou même des insectes, la taille des canaux semi-circulaires serait insuffisante pour qu'une différence de champ magnétique soit mesurable à ses extrémités. Plus l'organe est petit, moins il est sensible. L'évolution a donc pu garder plusieurs

solutions pour sentir le phénomène terrestre, chacune pouvant réagir à un paramètre différent. La magnétite serait une boussole capable d'indiquer le nord, le cryptochrome capterait l'angle du champ magnétique… Quant au système vestibulaire, on ignore encore s'il réagit à son orientation, son inclinaison ou son intensité…

Pour se repérer plus précisément, certaines espèces combineraient même plusieurs paramètres magnétiques en plus d'indices visuels — comme la position des étoiles ou du Soleil. C'est le cas des tortues de mer qui possèdent une véritable carte mentale pour retrouver leur plage préférée. Elles enregistrent la signature unique du champ magnétique du lieu de leur naissance : son inclinaison et son intensité. Le premier paramètre leur permettra de retrouver la latitude et le deuxième, en association avec la position du Soleil, la longitude. Elles sont ainsi capables de retrouver précisément leur plage de naissance depuis n'importe quel point du globe.


M.FELIX/NYT/REA

« Les papillons monarques utilisent le champ magnétique comme solution de secours lorsque le soleil n'est pas visible »

Christine Merlin, chronobiologiste, professeure associée à l'université A&M du Texas (États-Unis)

Une combinaison olfactive, visuelle et magnétique

Une telle carte mentale existe probablement chez plusieurs espèces. Elle pourrait aussi aider le saumon à retrouver l'embouchure de son fleuve pour y frayer. Mais l'étude de cette carte est difficile. Les animaux combinent volontiers plusieurs sens pour naviguer, associant les informations olfactives, visuelles et magnétiques. « *Les papillons monarques utilisent le champ magnétique comme solution de secours lorsque le soleil n'est pas visible* », indique par exemple Christine Merlin. Chaque nouveau résultat bénéficie d'une grande attention et les discussions sont parfois tendues. Comme celles sur l'existence d'un sens magnétique chez les mouches drosophiles. Michael Winklhofer s'esclaffe : « *Nous avons démontré que ce n'était pas reproductible et ça n'a aucun sens écologique. Ces mouches suivent les humains, pourquoi auraient-elles besoin d'un sens magnétique ?* » Christine Merlin est moins formelle : « *Il est possible que ce sens magnétique soit très ancien dans l'évolution. Il serait conservé et fort chez les espèces migrantes qui en ont l'usage et plus résiduel chez d'autres.* » D'ailleurs des observations suggèrent que les chiens solitaires, tels les terriers, pourraient sentir le champ magnétique. Concernant les chats, dont on sait qu'ils peuvent retrouver le chemin de leur maison en parcourant des centaines de kilomètres, aucune étude ne teste l'hypothèse d'une magnétoréception. Ce sixième sens reste un mystère biologique que la science commence seulement à percer. ■

EXPÉRIENCE

Certains humains sensibles au champ magnétique ?

C'est l'hypothèse folle de Joseph Kirschvink, géophysicien à la prestigieuse université Caltech (États-Unis). En 2016, il a invité 34 volontaires à s'asseoir dans une pièce imperméable au champ magnétique terrestre. Il les a ensuite soumis à un champ magnétique rotatif tout en enregistrant leur activité cérébrale. Pour un tiers d'entre eux, les scientifiques ont mesuré un changement significatif de certaines ondes cérébrales, les ondes alpha — qui manifestent souvent l'intégration d'un signal sensoriel. Chez quatre volontaires, l'intensité des ondes a chuté de plus de 60 %. « *Les volontaires chez qui on détectait un signal n'en étaient pas conscients. Ce qui suggère que ce n'est pas un sens* », tempère Michael Winklhofer, de l'université d'Oldenbourg (Allemagne). Car, si nous ne savons pas que nous percevons un phénomène, il ne peut être traité comme une information sensorielle. Personne ne remet néanmoins en cause la rigueur scientifique de Joseph Kirschvink. Celui-ci a même reproduit son expérience quelques mois plus tard et demandé à un collègue de l'université de Tokyo (Japon) de refaire, de manière indépendante, son protocole. Avec des résultats similaires. Ces conclusions restent cependant incongrues pour la communauté des spécialistes de la magnétoréception. Et personne, pas même Joseph Kirschvink, n'a poursuivi cette piste ou publié de nouvelles données chez l'humain. Par où prendre cette question ? « *Je ne ressens pas le champ magnétique, et je me perds facilement. Mais c'est mon expérience personnelle seulement…* », ironise le neurobiologiste David Keays.

SAWES ENERGY TECHNOLOGY

La structure volante, composée d'un ballon de 40 m de diamètre, accueille une couronne de 12 éoliennes. Elle a été testée avec succès en janvier à Yibin (Chine).

Une éolienne en plein ciel

Accusées d'enlaidir le paysage, de ne fonctionner que par intermittence ou de ne délivrer qu'une quantité modeste d'électricité, les éoliennes n'ont pas toujours bonne presse. En prenant leur envol elles pourraient redorer leur image.

Que faut-il à une éolienne pour qu'elle fonctionne ? La réponse semble évidente : du vent. Cependant, trouver un site idéal offrant des vents à la fois conséquents et relativement constants est moins simple qu'il n'y paraît, du moins sur terre. En revanche, entre 500 et 10 000 mètres d'altitude, ils répondent à ces impératifs. Le *jet-stream* (courant-jet), à très haute altitude, constitue même l'une des dernières grandes sources d'énergie encore inexploitées de la planète. Un constat qui a conduit la start-up pékinoise Sawes Energy Technology, avec la collaboration de l'université Tsinghua (Chine) et de l'Académie chinoise des sciences, à concevoir une éolienne volante.

Après diverses tentatives, le 19 janvier dernier, la start-up a testé avec succès son prototype, près de Yibin dans la province du Sichuan. Baptisée S2000, cette éolienne volante a atteint l'altitude de 2000 m en une trentaine de minutes. Elle a délivré durant ce vol d'essai 385 kilowattheures qui ont pu être appliqués au réseau électrique local, prouvant ainsi l'efficacité du système. Cette éolienne volante a de quoi impressionner. L'essentiel de sa structure repose sur un gigantesque ballon de 40 m de diamètre et 60 m de long, gonflé à l'hélium. Outre la portance que ce gaz offre au système, ce ballon a aussi pour mission de concentrer et accélérer encore le flux d'air sur une couronne accueillant 12 éoliennes élémentaires assez conventionnelles. Leur puissance cumulée atteint 3 mégawatts. L'électricité produite est rapatriée vers le sol par le câble qui, outre sa fonction de maintien en place de l'éolienne volante, porte un jeu de conducteurs électriques.

Un dispositif facilement transportable

Ce câble fait aussi appel à des études approfondies, tant les exigences auxquelles il doit répondre sont complexes. Tout d'abord, il doit être en mesure de supporter son propre poids, ce qui est loin d'être évident lorsque l'on sait que sa longueur peut atteindre — voire dépasser — les 10 km. En effet, le ballon captif ne se trouve jamais à l'aplomb de son point d'ancrage au sol, mais, tel un cerf-volant, reste distant de celui-ci. À cela il faut ajouter la traction qu'exerce le ballon captif poussé par le vent. Des matériaux à base de fibre de carbone associés à des résines sont à l'étude pour optimiser le rapport poids-résistance à la traction de ce câble d'arrimage.

Néanmoins, cette technologie en rupture par rapport à celle des éoliennes terrestres ne manque pas d'atouts. Outre le fait qu'elle ne nécessite que très peu de place au sol pour être déployée et ne nuit plus à la qualité de vie de son voisinage, elle est facilement transportable. Une fois dégonflé, le ballon tient dans un camion et l'ensemble du dispositif ne pèse guère plus d'une tonne (sans le câble). Les éoliennes volantes devraient ainsi pouvoir devenir des générateurs électriques de secours pour venir en aide à des territoires sinistrés, par exemple, ou alimenter en électricité des zones difficilement accessibles. ■ **Henri-Pierre Penel**

Sauver le pernambouc sans perdre l'archet

L'exploitation de ce bois brésilien est de plus en plus restreinte du fait de sa raréfaction. Or, ce bois exotique sert à la confection des archets modernes des musiciens. Des recherches sont effectuées sur d'autres essences afin de trouver des alternatives acceptables.

« *Un sursis de trois ans.* » C'est ainsi que l'archetier Pascal Camurat voit la décision de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (Cites) concernant le pernambouc. La COP20, réunie fin 2025 à Samarcande (Ouzbékistan), a renoncé pour la deuxième fois à classer à l'annexe I de la Cites cette essence de bois dont sont faits la majorité des archets modernes. Un transfert dans cette section regroupant les espèces les plus menacées aurait rendu son utilisation et sa circulation interdites, sauf dérogation. Mais pour contrôler davantage le commerce de *Paubrasilia echinata*, inscrit depuis 2007 à l'annexe II (la liste des espèces qui pourraient devenir menacées d'extinction), une nouvelle annotation #10 vient d'entrer en vigueur : le commerce d'archets finis (hors Union européenne) est désormais soumis à un permis Cites et seuls les mouvements non commerciaux (concert, exposition, prêt, réparation…) sont exemptés.

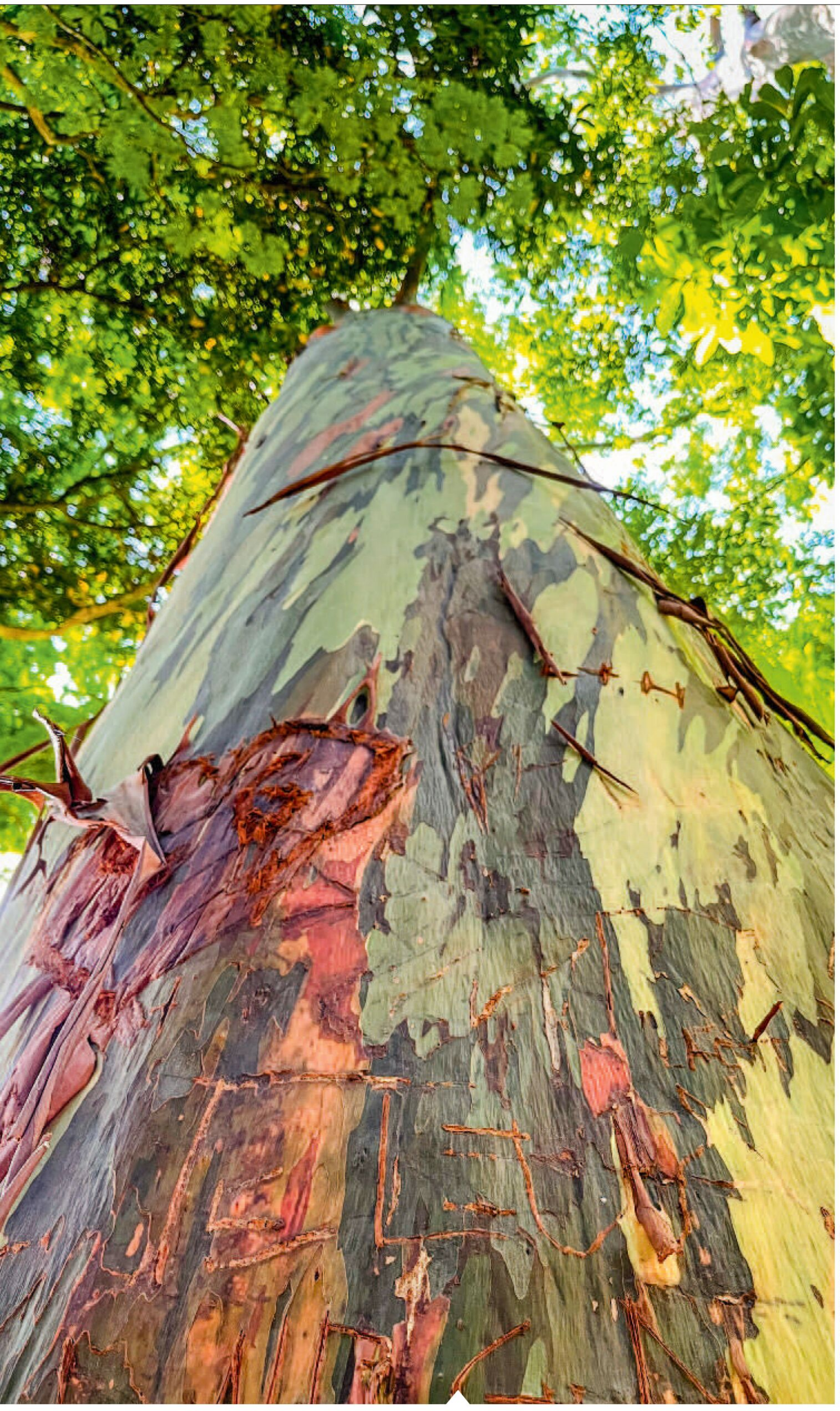
BRUNO BOURGEOIS

De fait, le « pau-brasil » (« bois de braise » en français), qui a donné son nom au Brésil, est une espèce d'arbre endémique qui ne pousse que dans la forêt Atlantique (*Mata Atlântica*). Or, entre 1985 et 2024, la déforestation l'a privée de 2,4 millions d'hectares, selon une étude du réseau scientifique mondial MapBiomas, soit quasiment la superficie de la Bretagne (2,7 millions ha). Et l'exploitation commerciale du pernambouc et le manque de mesures de protection et de conservation ont conduit à une réduction de son aire de répartition de 84,33 %, selon le Centre national de conservation de la flore brésilien.

Trouver des espèces avec des propriétés mécaniques proches

Face à la raréfaction du pernambouc, la fibre de verre, à partir du milieu des années 1960, puis la fibre de carbone dans les années 1990, ont été les premières alternatives proposées. Outre leur incompatibilité avec les outils traditionnels des archetiers, elles n'ont pas réussi à acquérir la même stature que le pernambouc, selon Charles Espey, archetier américain depuis 46 ans. « *Les archets en fibre de carbone conviennent aux étudiants mais ne sont jamais devenus populaires auprès des musiciens professionnels, qui ont besoin d'un archet dont les qualités sonores correspondent à celles de leur instrument.* »

La recherche se tourne alors vers les quelque 60 000 espèces d'arbres connues pour trouver des essences pouvant riva-



EDIANY HOLLANDA/SHUTTERSTOCK

Arbre endémique de la forêt Atlantique au Brésil, « Paubrasilia echinata » a vu une réduction de 84,33 % de son aire de répartition. Alors qu'il est inscrit à la Cites comme espèce pouvant être menacée d'extinction, une récente annotation réglemente encore plus son commerce.

HISTOIRE

Du pigment rouge à l'archet moderne

Peu après leur arrivée sur la côte sud-américaine en 1500, les Portugais commencent l'exploitation du pernambouc, en extrayant des pigments rouges de son bois de cœur pour les utiliser en teinture. Rien qu'au XVIe siècle, environ 6000 km² de la forêt Atlantique sont détruits. Malgré des efforts de réglementation (l'interdiction d'abattre de jeunes arbres instaurée en 1605), son utilisation continuera jusqu'à l'apparition, au milieu du XIXe siècle, des colorants synthétiques. Vers 1775, l'archetier français François Xavier Tourte reconnaît les qualités du pernambouc et l'adopte pour créer l'archétype de l'archet moderne, plus long et avec un cambre plus accentué. Au début du XIXe siècle, il devient le bois majoritaire pour la fabrication des archets modernes. Connu pour sa durabilité, il était aussi utilisé comme matériau de construction : poteaux, traverses de chemin de fer et revêtements de sol.

liser avec le pernambouc. « *On peut chercher, par proximité botanique, des espèces ayant une organisation cellulaire ou une chimie voisines, s'intéresser aux espèces avec des propriétés mécaniques proches (densité, rigidité et élasticité spécifique), mais les données n'existent que pour une fraction, ou encore se baser sur les usages historiques et le savoir empirique des archetiers* », énumère Iris Brémaud, directrice de recherche au CNRS spécialisée dans le bois au Laboratoire de mécanique et génie civil du CNRS et de l'université de Montpellier. Les pistes les plus exploitées sont celles des propriétés mécaniques et des usages historiques. Malgré sa grande diversité — l'espèce a trois morphotypes et cinq lignées, et des variations de densité du bois d'un arbre à l'autre et au sein d'un même arbre, entre la base et la cime et entre l'écorce et le

cœur du tronc —, le pernambouc se distingue par son très faible amortissement des vibrations, en lien avec la présence d'extractibles, dont la braziline qui lui confère sa teinte rouge orangé. *« Certains pensent qu'un faible amortissement est essentiel pour obtenir un archet de haute qualité. Mais aucune explication convaincante n'a été donnée quant à cette relation »*, relève Eiichi Obataya, professeur associé à l'université de Tsukuba (Japon), spécialiste de la physique du bois. Avec un faible amortissement, l'énergie fournie par le musicien servirait à mettre en vibration la corde, plutôt que d'être absorbée par l'archet, ce qui en ferait un bon matériau.

En se concentrant sur trois propriétés clés — densité, vitesse de propagation du son et élasticité —, une étude brésilienne de 2010 conclut que l'ipé, le cumaru et le jatobá constituaient les meilleurs candidats. Problème : les deux premiers figurent à l'annexe II de la Cites et ne sont donc pas des alternatives de long terme. De plus, leur couleur diffère du rouge orangé caractéristique du pernambouc, tout comme le satiné ou des espèces du genre *Swartzia* (non menacés) approuvés par des études japonaises et allemandes en 2010 et 2007.

PRODUCTION

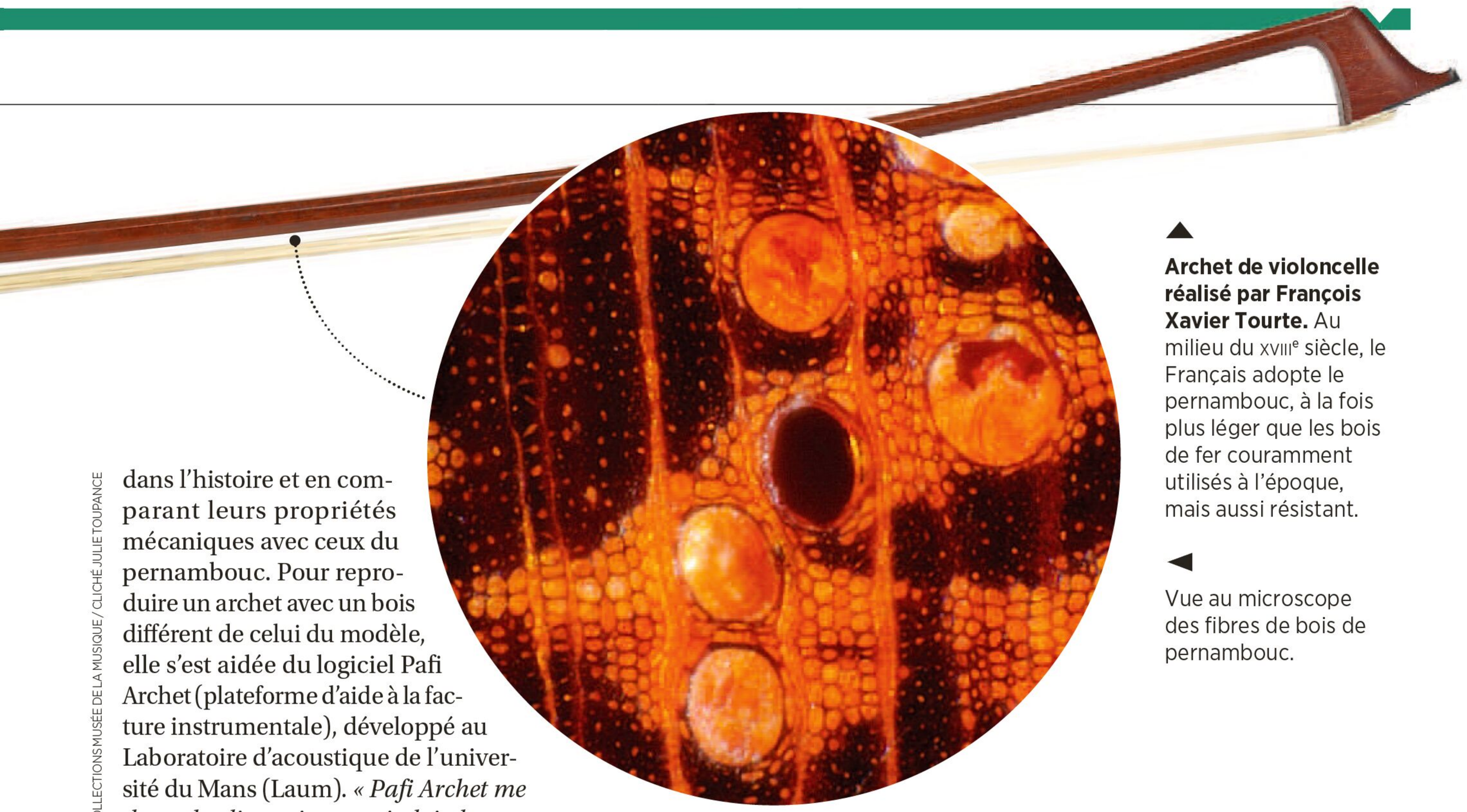
Le pari des plantations pour répondre à la demande mondiale

« Au moins 50 000 arbres de pernambouc ont poussé dans des plantations commerciales et si l'on inclut les arbres plantés dans les rues et les parcs, ce chiffre est bien plus élevé », affirme Daniel Piotto, professeur en sciences agroforestières de l'université fédérale du sud de Bahia (Brésil). Les premières plantations ont été ouvertes à la fin des années 1990 à l'initiative d'archetiers brésiliens, de l'exportateur de bois allemand Horst John, de propriétaires de plantations de cacao ou encore de l'International Pernambuco Conservation Initiative (IPCI) dans les États d'Espírito Santo, Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte et Paraíba notamment. Selon l'archetier américain Charles Espey, qui a réalisé un inventaire des plantations à Espírito Santo, *« il y aurait suffisamment de pernambouc dans deux des plus grandes plantations de l'État pour répondre de manière durable à la demande mondiale en bois pour la fabrication d'archets »*. Mais plusieurs questions méritent des études approfondies : *« Quelle est la qualité du bois issu de ces plantations et quel âge doit avoir un arbre pour fournir du bois de qualité suffisante pour la fabrication d'archets ? »*, s'interroge Daniel Piotto, qui mène une recherche à ce sujet. Par ailleurs, *« nous ne savons pas comment amener ces arbres à produire plus de composés chimiques défensifs (extractibles dont la braziline responsable de la teinte rouge orangé). Une piste serait de les stresser davantage pour augmenter leur production »*, explique Laurence Schimleck, professeur en science et ingénierie du bois à l'université d'État de l'Oregon (États-Unis).

Le visuel influe sur la perception auditive

« On a tendance à penser d'abord à la dimension acoustique, au risque de sous-estimer les dimensions sociales, historiques et ce qui relève de la relation entre l'humain et le bois. Mais le savoir-faire dans la façon dont le bois se travaille et cette couleur rouge, avec un aspect brillant amplifié par la finition, joue un rôle dans l'attachement des musiciens et des archetiers à ce bois », avance Iris Brémaud. Par ailleurs, *« les informations d'ordre visuel ont une influence sur la perception auditive. C'est pour cela que les études à l'aveugle sont nécessaires »*, précise Claudia Fritz, chercheuse en acoustique musicale à l'institut Jean-Le-Rond-d'Alembert (Sorbonne Université/CNRS), qui a mené plusieurs études à l'aveugle montrant que des violons modernes étaient souvent préférés aux mythiques Stradivarius. Aucune étude à l'aveugle n'a été menée montrant une différence de perception auditive entre un archet en pernambouc et d'autres fabriqués dans des matériaux alternatifs.

Des alternatives au pernambouc, l'archetière pour la musique ancienne Nelly Poidevin installée à Dinan (Côtes-d'Armor) en a testées plus d'une quarantaine, en reprenant des bois déjà utilisés



▲

Archet de violoncelle réalisé par François Xavier Tourte. Au milieu du XVIIIe siècle, le Français adopte le pernambouc, à la fois plus léger que les bois de fer couramment utilisés à l'époque, mais aussi résistant.

◄

Vue au microscope des fibres de bois de pernambouc.

COLLECTIONS MUSÉE DE LA MUSIQUE / CLICHÉ JULIE TOUPANCE

dans l'histoire et en comparant leurs propriétés mécaniques avec ceux du pernambouc. Pour reproduire un archet avec un bois différent de celui du modèle, elle s'est aidée du logiciel Pafi Archet (plateforme d'aide à la facture instrumentale), développé au Laboratoire d'acoustique de l'université du Mans (Laum). *« Pafi Archet me donne les dimensions que je dois donner à ma baguette, en tenant compte de la densité et de l'élasticité. Je peux savoir de quelle base partir pour obtenir soit la même rigidité, soit le même poids ou composer avec les deux. »*

« Quand on change d'essence de bois, l'archetier doit effectuer de légers ajustements géométriques (épaisseur de la baguette, cambrure) pour conserver l'équilibre mécanique de l'archet. On sait notamment que la manière dont l'archetier dimensionne une baguette influence sa raideur, et ce beaucoup plus que la rigidité même du matériau utilisé », expose Frédéric Ablitzer, enseignant-chercheur au Laum.

Selon Nelly Poidevin, les bois exotiques comme la grenadille, l'amourette, le bosco, le coraçao de negro, le campêche, le preciosa ou le greenheart ont donné des résultats intéressants. Mais *« les belles surprises »* ont été le bois takari, le caraipé à longue feuille ou le foengoe testés dans une étude avec les chercheurs du CNRS et du Cirad en Guyane et qui servent aux Amérindiens à construire leurs maisons sur pilotis. Ils ne sont toutefois pas ou peu commercialisés en Europe, et leur couleur, très claire, peut aussi être un frein. Pas pour tous…

Un archet en acacia d'Afrique, jaune safran

Le violoniste Pierre Frapier, de l'orchestre Lamoureux, a adopté il y a 2-3 ans un archet en acacia d'Afrique, jaune safran, fabriqué par Pascal Camurat. *« Ça m'a étonné car il était assez similaire à un archet en pernambouc, tant sur le plan sonore que celui de la jouabilité. Mais il faut oser : un archet jaune comme celui-là, dans un cadre orchestral, ça détonne un peu. »* Il existe une *« multitude de possibilités, comme chaque bois a un timbre particulier. L'idéal serait de trouver une palette d'alternatives pour qu'il y ait moins de tensions sur le pernambouc »*, souligne Nelly Poidevin. Mais l'archetier Arthur Dubroca, président d'IPCI France-Europe, une organisation à but non lucratif dédiée à la préservation du pernambouc qui a financé des plantations au Brésil, craint qu'*« en se concentrant sur la recherche d'alternatives, on porte moins attention à la préservation du pernambouc et on rompe avec une tradition de fabrication artisanale qui existe depuis plus de 250 ans »*.

Pour l'archetier Pascal Camurat, membre du groupe de travail IPCI sur les matériaux alternatifs, *« le plus grand défi sera de convaincre les archetiers mais surtout les musiciens. Car un archet peut bien marcher mécaniquement, mais ça ne signifie pas qu'il aura une réponse aussi sensible que l'attend le musicien »*, note Nelly Poidevin. Il s'agit d'une *« équation complexe »*, selon Orlando Faneite Moreno, violoniste baroque et moderne vénézuélien : *« Le musicien choisit un archet en fonction de l'instrument qui l'accompagne, de ses sensibilités musicales, de sa personnalité, des émotions qu'il cherche à transmettre. C'est très subjectif »*. Un ressenti que la science peine encore à cerner. ■ **Chisato Goya**

COSIMO CELLA

« En se concentrant sur la recherche d'alternatives, on porte moins attention à la préservation du pernambouc »

Arthur Dubroca, archetier, président de l'Initiative internationale pour la conservation du pernambouc (IPCI) France-Europe

R. SELVATICO - CNR - ICE MEMORY FOUNDATION ; G. MASSIMO MACRI / PNRA-IPEV

G. MASSIMO MACRI / PNRA-IPEV

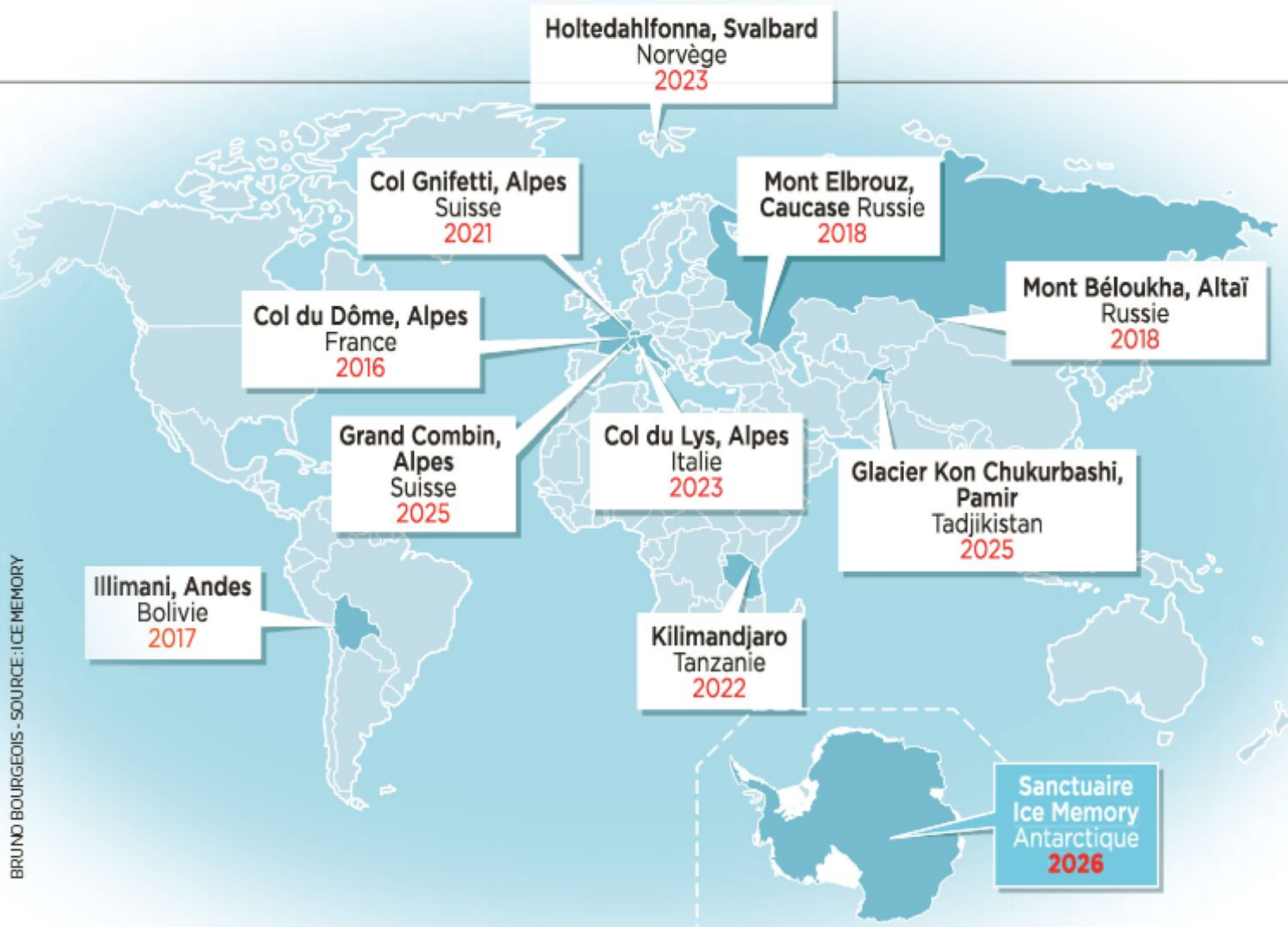
Un sanctuaire pour les archives glaciaires

Au cœur de l'Antarctique vient d'être inauguré Ice Memory, une initiative visant à conserver par –52 °C des carottes prélevées dans les plus hauts sommets du monde, menacés par le réchauffement. À la clé, la sauvegarde d'informations essentielles sur le climat passé et actuel.

Un coup de ciseau dans un ruban tendu au milieu d'un tunnel de glace à ciel ouvert, alors que le thermomètre affichait une température extérieure de -28 °C, a symbolisé l'inauguration de la première bibliothèque mondiale de carottes de glaciers menacés. L'événement s'est tenu le 14 janvier, près de la station franco-italienne Concordia, établie au cœur de l'inlandsis antarctique, soit l'un des endroits les plus reculés du monde. Il a suffi ensuite de pousser une simple porte en bois pour déposer les premiers conteneurs blancs dans cette grotte artificielle de 35 mètres de long, excavée dans la glace à environ 5 m sous la surface et située à 3200 m d'altitude. Ils contiennent deux carottes de glace, dont la première prélevée sur le massif du Mont-Blanc, au col du Dôme en 2016.

C'était là la première expédition menée par le consortium Ice Memory. Un projet officiellement lancé un an plus tôt, en 2015, par une communauté de glaciologues français, italiens et suisses, soucieux de voir disparaître sous leurs yeux les archives des climats passés de la Terre, qui *« vont fondre et finir dans l'océan »*, souligne Thomas Stocker, physicien et climatologue suisse, président de la fondation Ice Memory. Dès les années 1990-2000, en effet, les glaciologues constatent une accélération spectaculaire de la fonte des glaciers de montagne. Une vaste synthèse scientifique publiée en 2025 dans *Nature* montre que *« depuis 2000, les glaciers ont perdu entre 2 % et 39 % de leur glace selon les régions, et environ 5 % à l'échelle mondiale. La perte de masse des glaciers est plus de deux fois supérieure à celle de la calotte antarctique. »*

Or, en piégeant dans leurs cristaux des bulles d'air, ces glaciers conservent dans leurs strates — constituées de centaines d'années de chutes de neige — des aérosols, des poussières et des polluants, qui constituent la mémoire de l'atmosphère, des variations climatiques passées et des impacts des activités humaines. La perte définitive de ces archives naturelles aura une réelle incidence scientifique, car si les glaces des calottes polaires



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : ICE MEMORY

Dix carottes de glace ont déjà été prélevées ces dix dernières années et seront progressivement entreposées dans la grotte Ice Memory, près de la station Concordia, en Antarctique. Dix autres carottes suivront au cours de la prochaine décennie.

fournissent des tendances à l'échelle mondiale, celles des glaciers sont riches d'informations régionales. L'étude des suies émises lors d'un feu de forêt permet, par exemple, de connaître les essences des arbres qui la composaient alors et qui étaient peut-être très différentes de celles qui les ont remplacées. D'où l'idée d'une sauvegarde préventive de ces glaces avant leur disparition. Dès son lancement en 2015, Ice Memory s'est engagé dans une course contre la montre. L'objectif de collecter 20 carottes en vingt ans tient la corde, puisqu'en dix ans, dix carottes ont déjà été prélevées et préservées dans les congélateurs de laboratoires. La première grande expédition fondatrice a ainsi atteint le col du Dôme, dans les Alpes, à plus de 4200 m. L'étape suivante a conduit les équipes sur le glacier équatorial de l'Illimani, en Bolivie, à plus de 6400 m d'altitude. Cette mission a permis de préserver des glaces rares, témoins de la variabilité climatique des tropiques, mais aussi de l'histoire environnementale et humaine de l'Amazonie et de l'altiplano. Cap a ensuite été mis dans le Caucase, sur le mont Elbrouz, le plus haut sommet d'Europe, où les glaces témoignent de l'influence croissante des pollutions industrielles sur le continent.

Mesurer l'évolution des glaciers alpins sur un temps court

S'ensuivent des expéditions au Pamir, en Asie centrale, dans les Andes, dans l'Himalaya et sur plusieurs glaciers alpins, dont les Alpes suisses, avec le forage du Grand Combin en 2025. Cette carotte, extraite près d'une décennie après celle du Mont-Blanc, permet de mesurer l'évolution rapide de l'état des glaciers alpins sur un temps très court. Elle fait partie des deux premières carottes choisies pour être transférées vers l'Antarctique. Cette 1,7 tonne de glace a été maintenue à -20 °C au cours d'un voyage de plus de cinquante jours à bord du navire de recherche *Laura-Bassi*.

Toutes ces expéditions ont en commun une philosophie singulière : une partie des carottes est analysée immédiatement, mais une autre est soigneusement scellée, documentée et conservée intacte. Ces glaces ne sont pas seulement des échantillons scientifiques ; elles sont désormais des objets de mémoire, notamment de l'impact de l'humanité sur notre planète. Il s'agit maintenant de les transporter jusqu'à Concordia où elles seront conservées dans des conditions naturelles, pour les transmettre intactes aux générations futures, en pariant sur les progrès scientifiques et technologiques à venir. L'Antarctique comme lieu de dépôt est un choix de long terme, en raison de ses températures extrêmes. La grotte établie à Concordia affiche ainsi une température stable de -52 °C. Sa construction a consisté au creusement de la calotte par une pelleteuse pour y ménager un ample couloir. Une sorte de ballon gonflable géant a ensuite conservé l'espace intérieur tandis que le « toit » était remblayé, explique Silvano Onofri, professeur à l'université de la Tuscia, en Italie.

Il s'agit désormais d'intensifier la collecte de manière à emmagasiner dix carottes supplémentaires au cours de la prochaine décennie, car le temps climatique presse. Or *« ces informations climatiques sont la base des décisions politiques,* estime Thomas Stocker. *Savoir d'où nous venons permet de comprendre ce qui se passe aujourd'hui. »* ■ **Sylvie Rouat**

ICE MEMORY

« Ces informations climatiques sont la base des décisions politiques »

Thomas Stocker, physicien et climatologue, président de la fondation Ice Memory

IA

La révolution dans la santé

Prédiction de maladies, aide au diagnostic, consultation psy, traitements des cancers, modélisation des épidémies… L'IA générative va devenir un outil incontournable pour les professionnels de la santé. À condition que la décision ultime appartienne toujours au corps médical.

Dossier réalisé par
Arnaud Devillard, Nicolas Gutierrez C., Hugo Jalinière, Coralie Lemke

SHUTTERSTOCK PHOTOMONTAGE SETA

SOMMAIRE

ENTRETIEN Bernard Nordlinger : « Je crois au concept de médecin augmenté » p. 52 **DIAGNOSTIC** Les algorithmes devinent nos futures maladies p. 54 **RECHERCHE** Anticiper le parcours de soins du patient p. 59 **SANTÉ MENTALE** Ces IA qui jouent au psy p. 61 **TRAITEMENTS** Le cancer à l'épreuve des IA génératives p. 64 **MODÉLISATION** Prédire la prochaine pandémie p. 67

BERNARD NORDLINGER

PRÉSIDENT DE LA COMMISSION SCIENCE NUMÉRIQUE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DE L'ACADÉMIE NATIONALE DE MÉDECINE

« Je crois au concept de médecin augmenté »

Pour ce chirurgien spécialisé dans les thématiques « santé et intelligence artificielle » au sein de l'Académie nationale de médecine, tous les professionnels du soin doivent s'approprier les outils d'IA, mais aussi en connaître les risques, et expliquer au patient quand on s'en est servi.

Est-ce que l'irruption de l'IA constitue une rupture dans la pratique médicale ?

C'est à la fois une rupture et un *continuum*. De tout temps, les médecins ont dû s'adapter aux progrès de la connaissance et de la science. Aujourd'hui, l'IA générative constitue une rupture dans la rupture ; et viendront ensuite les IA agentiques [IA capables de décider et d'agir]. Sans la comparer au stéthoscope en son temps, l'IA est un outil pour les médecins. Tous doivent s'y mettre : il est indispensable de comprendre ce que sont ces IA, d'en connaître les risques, et d'expliquer au patient quand on s'en est servi. Une formation au numérique intégrant l'IA a d'ailleurs été introduite dans le tronc commun de médecine.

Vous vous intéressez à l'IA depuis 2017 et vous y avez déjà consacré deux ouvrages avec Cédric Villani*. Quelle est votre vision de l'IA en médecine en 2026 ?

Le message, c'est qu'il faut toujours une validation humaine, une validation médicale, d'une proposition de l'IA. Deuxième point : il y a un grand pas — un viaduc, même — entre ce que disent les experts et l'appropriation par le terrain. Je distingue deux domaines. D'une part, les applications techniques : en imagerie, par exemple, l'IA s'est déjà imposée. On ne peut plus faire d'imagerie ou d'anatomopathologie sans elle, ne serait-ce que parce que les médecins ont une obligation de moyens — et c'en est un. D'autre part, l'aide au médecin généraliste, qui doit synthétiser les éléments techniques dont il dispose pour établir un diagnostic et proposer un traitement : là, c'est plus difficile, car il faut gérer l'incertitude.

Côté patients, OpenAI dit que 230 millions de personnes posent des questions à ChatGPT chaque semaine : c'est énorme. Le taux de réponses correctes serait de 85 à 90 %, mais en santé, les 10 % restants, c'est plus qu'embêtant.

BIO EXPRESS

- **14 juillet 1947 :** Naissance à New York (États-Unis).
- **1985 :** Professeur de chirurgie.
- **1997 :** Chef du service de chirurgie digestive et oncologique de l'hôpital Ambroise-Paré (AP-HP).
- **2014 :** Membre titulaire de l'Académie nationale de médecine.
- **2017 :** Fondateur avec Cédric Villani du groupe de travail IA et santé de l'Académie de médecine et l'Académie des sciences.
- **2024 :** Président de la commission science numérique et intelligence artificielle de l'Académie de médecine.

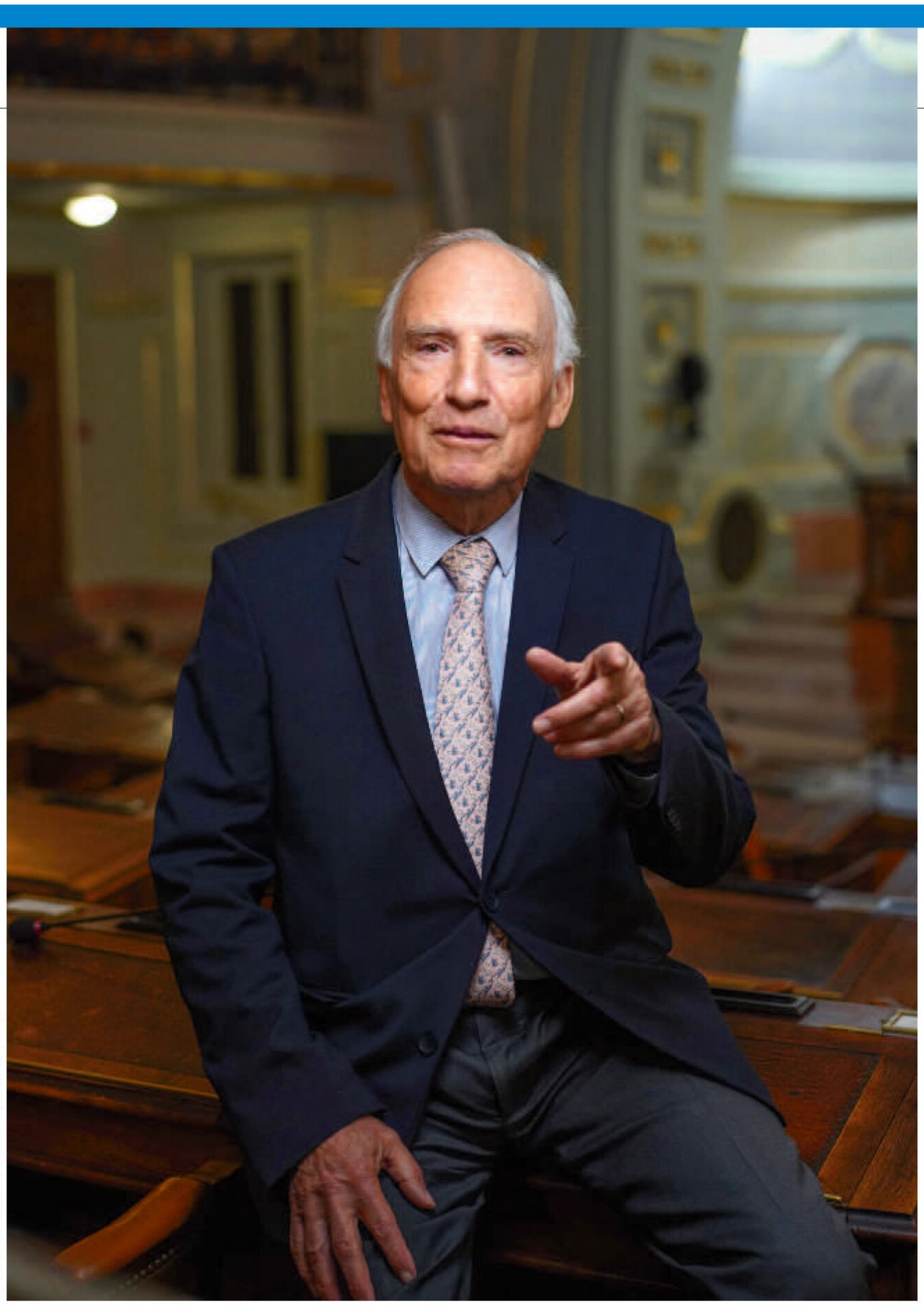
À l'Académie de médecine, notre rôle est d'apporter une parole raisonnée et raisonnable pour ne pas se laisser aveugler par de tels effets d'annonce.

N'observe-t-on pas une rupture des pratiques entre les États-Unis et l'Europe ?

Aux États-Unis, les outils d'IA s'orientent vers de véritables conseillers médicaux. En Europe, nous en sommes très loin : ils devraient être considérés comme des dispositifs médicaux et être approuvés comme tels — et il y a de fortes chances qu'ils ne le soient pas. Les IA génératives sont aujourd'hui beaucoup plus faciles d'accès, plus conviviales, et gratuites dans leurs versions les plus simples. Elles donnent l'impression de parler à un copain ; mais ce n'est pas un copain, parce qu'elles produisent un avis qui peut être faux. Il ne faut pas leur confier ses données personnelles : on ne sait pas ce qu'il en advient.

Une étude polonaise a montré une baisse de l'expertise humaine d'un groupe d'endoscopistes digestifs six mois après le recours à l'IA : n'y a-t-il pas un risque de perte de compétences chez les médecins qui l'utilisent ?

Le risque existe, mais il faut être prudent. La médecine, ce ne sont pas seulement



BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

« Il faut espérer que l'IA ne permettra pas de voir plus de patients, mais de mieux les voir »

des raisonnements sur des informations : c'est aussi un examen clinique, un rapport avec le patient. J'ai toujours enseigné à mes élèves que, pour ne pas faire de gros contresens, il faut examiner cliniquement : c'est essentiel. Les IA répondent certes très bien aux questions d'examen ; c'est normal, puisqu'elles ont été entraînées pour cela. Ce n'est pas pour autant qu'elles vont remplacer les médecins. Ces derniers intègrent les informations dans le contexte particulier d'une personne. Par ailleurs, l'IA permettra de gagner du temps sur des tâches automatiques — résumer un dossier complexe, rédiger des comptes rendus, en extraire des informations utiles — et d'en libérer pour les activités cognitives. Je crois beaucoup au concept du médecin augmenté, pas du tout à celui du médecin automatique. Il faut espérer que l'IA ne permettra pas de voir plus de patients, mais de mieux les voir.

Comment va-t-on définir la responsabilité médicale si une décision, prise avec l'aide de l'IA, s'avère mauvaise ?

C'est très clair : le médecin a le monopole du soin ; il est responsable des outils qu'il utilise, et s'il se trompe, c'est lui qui est responsable. Quant au fabricant, le règlement européen, l'AI Act, stipule qu'il n'est responsable que s'il y a une défaillance. On ne peut pas demander à un médecin d'expliquer la « boîte noire », c'est-à-dire ce qu'il se passe entre la question et la réponse ; mais on peut — et on doit — lui demander d'expliquer la logique de la recommandation. Le médecin n'a pas l'obligation de suivre l'IA, il conserve son libre arbitre, mais il doit pouvoir expliquer pourquoi il ne la suit pas. Il n'y a pas encore eu de contentieux, mais il risque d'y en avoir.

Quelle est l'incidence de l'IA sur la recherche ?

J'ai beaucoup fait de recherche clinique, et monté une dizaine d'essais cliniques internationaux : c'est extrêmement compliqué. Valider un nouveau médicament jusqu'à la mise sur le marché coûte 2,5 milliards de dollars ; or les deux tiers vont à la partie clinique. Cela peut prendre dix ans pour organiser, recruter les patients, trouver les financements, etc. Aujourd'hui, il est possible de monter des essais de phase 3 avec des cohortes virtuelles : avec 50 patients, on peut en créer 1500 virtuels. On peut aussi utiliser des données de vie réelle issues des systèmes de données de santé pour établir un groupe contrôle. Cela simplifie grandement la recherche clinique. En laboratoire, analyser très vite de grandes quantités de données représente aussi un progrès considérable, notamment pour tester un principe actif en vue de fabriquer un nouveau médicament. Je pense qu'à peu près tous les chercheurs utilisent l'IA, tous les jours. ■

Propos recueillis par H. J. et M. N.

* « Santé et intelligence artificielle » (2018), « Médecine et intelligence artificielle » (2022), CNRS Éditions.

DIAGNOSTIC

Les algorithmes devinent nos futures maladies

Prédiction des pathologies, détection des mutations génétiques, aide à la greffe… L'IA a un vrai potentiel en santé, mais pour cela, elle doit d'abord gagner la confiance des médecins en cessant d'être une « boîte noire ».

L'intelligence artificielle deviendra-t-elle la meilleure alliée des médecins ? Déjà très utilisée dans la détection précoce des cancers *(lire p. 64)*, l'IA continue de se déployer dans tous les autres domaines de la médecine. Sa première force : pouvoir prendre en considération la mine d'informations que représente l'histoire médicale des patients. C'est notamment grâce à ces données que le modèle d'intelligence artificielle Delphi-2M, conçu au Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), parvient à prédire le risque de développer plus d'un millier de maladies durant les deux prochaines décennies. Présentée en septembre 2025 dans *Nature*, cette IA utilise une approche similaire à celle des grands modèles de langage (tels que ChatGPT), mais avec un changement majeur : *« Dans ces modèles, on a une séquence de mots avec des espaces entre eux. Or, il y a toujours la même distance qui sépare les mots. Mais en santé, cette distance varie, car elle représente le temps entre deux événements de santé : disons qu'un patient fait un infarctus et puis une pneumonie ; si les deux diagnostics ne sont séparés que d'un jour, ce patient est dans un état très grave, alors que si deux années se sont écoulées entre l'infarctus et la pneumonie, la situation est très différente »*, illustre le bio-informaticien Ewan Birney, directeur par intérim de l'EMBL.

Delphi-2M a été modifié pour prendre en compte cette variable temporelle et ainsi faire le lien entre les différents problèmes de santé d'un même patient. *« Ça paraît plus simple de modéliser séparément chaque maladie, mais ça ne refléterait pas la réalité,* affirme Ewan Birney. *Dans la vraie vie, plusieurs maladies peuvent survenir, et elles dépendent les unes des autres. Par exemple, si quelqu'un a un cancer, cela change sa probabilité de développer une maladie cardiaque, notamment parce que sa prise en charge médicale sera très différente. »*

EXPÉRIMENTATION

Une IA pour renouveler les prescriptions

Aux États-Unis, l'Utah a lancé en janvier une vaste expérimentation pour permettre à une IA de remplacer le médecin lors du renouvellement de prescriptions. Ce plan pilote durera 12 mois, durant lesquels l'IA Doctronic (un chatbot médical) « verra » des patients et validera ou non le renouvellement, moyennant quatre dollars. Pour cela, elle utilise une base de données alimentée par des pharmacies afin de vérifier que le patient prend bien le médicament en question. Cette décision est soutenue par des résultats publiés en juillet 2025 dans un preprint (article non encore revu par les pairs), où les concepteurs de Doctronic affirment que cet outil parvient à trouver le bon diagnostic dans 81 % des cas et que ses conclusions sur le traitement à suivre s'alignent à 99 % avec ceux de vrais médecins.

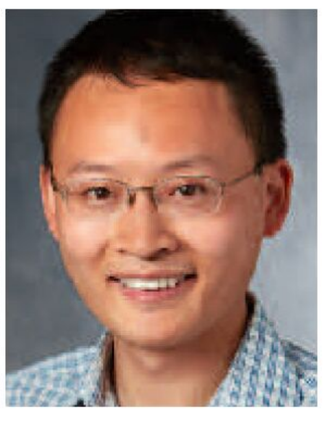
Déduire la trajectoire de santé la plus probable

La force de ces intelligences artificielles est de faire des liens. De la même façon que ChatGPT établit des liens entre des mots pour en prédire le prochain, les IA prédictives en santé comprennent comment différentes données sont liées pour en déduire la trajectoire de santé la plus probable. Et pour cela, elles peuvent utiliser toute une panoplie de mesures, y compris celles générées durant le som-

R. ORENBUCH ET AL.- BSIP- PHOTOMONTAGE JL GILABERT/ SCIENCE ET AVENIR

meil. C'est le cas de SleepFM, conçue à l'université Stanford aux États-Unis et présentée en janvier dans *Nature Medicine*. Elle utilise des données de polysomnographie, un examen médical pour étudier la qualité du sommeil et déceler des troubles tels que les apnées *(lire aussi p. 70)*. Ainsi, elle combine plusieurs variables physiologiques, dont l'activité cérébrale, les mouvements oculaires, l'activité cardiaque et respiratoire, ou encore la fonction musculaire des bras et des jambes. *« Le but de SleepFM est d'apprendre le langage du sommeil en intégrant ces différentes mesures, ce qui lui permet de prédire jusqu'à 130 maladies différentes à partir des enregistrements d'une seule nuit »*, résume son créateur, James Zou, professeur associé en sciences des données biomédicales à l'université Stanford. Selon l'étude, cet outil est particulièrement efficace pour prédire la maladie de Parkinson et des démences (pathologies où les troubles du sommeil seraient des indicateurs précoces), des problèmes cardiaques causés par l'hypertension, des hémorragies cérébrales, ainsi que les cancers de la prostate, du sein et de la peau, et le risque de mortalité dans un futur proche.

Cette IA illustre bien l'avantage de ces outils pour le diagnostic et la prédiction en santé, qui nous permettent de com-



UNIVERSITE STANFORD

« SleepFM peut prédire jusqu'à 130 maladies différentes à partir des enregistrements de sommeil d'une seule nuit d'un patient »

James Zou, professeur associé en sciences des données biomédicales à l'université Stanford, aux États-Unis

biner différentes observations médicales pour capturer une image plus complète de l'état de santé d'une personne. *« Elle arrive à se faire une représentation beaucoup plus riche du sommeil et capture de façon plus holistique toute la physiologie du corps avec une résolution très élevée, permettant d'en révéler les nuances et de faire des associations que nous ne voyions pas auparavant »*, souligne James Zou. Le plus difficile est la collecte de données, car on ne fait pas tous des polysomnographies régulières ! Mais la multiplication de dispositifs portatifs qui mesurent des paramètres de santé, tels que les montres ou les bagues connectées, pourrait combler ce manque de données. *« C'est la prochaine étape; même si les informations recueillies par ces dispositifs ne sont pas aussi riches, ils capturent des signaux très intéressants sur le long terme, et ils faciliteraient une application beaucoup plus large de ces technologies de prédiction »*, prévoit-il. D'autres IA se développent en parallèle pour les pathologies les plus difficiles à diagnostiquer. C'est notamment le cas des maladies génétiques rares, où le diagnostic est très difficile précisément à cause de leur rareté. Lorsqu'il y a plusieurs cas d'une même maladie, on peut les étudier pour en comprendre les causes, ce qui facilite sa détection ultérieure pour tout nouveau cas ; mais, lorsqu'il n'y a que très peu de cas (sachant que ces maladies peuvent être répertoriées sur un seul individu), il n'y a tout simplement pas suffisamment de données pour faire ces analyses. La seule possibilité alors est d'analyser l'ensemble du génome de la personne, pour en déceler les mutations génétiques qui pourraient être à l'origine de la maladie… Mais il peut y en avoir des millions ! C'est là que l'IA opère sa magie.

Décrypter les mutations génétiques

« Ces maladies sont très graves en général, c'est-à-dire qu'elles sont causées par des mutations avec un haut potentiel de pathogénicité, ayant un impact phénotypique élevé », rappelle Yuval Itan, généticien à l'École de médecine Icahn au Mont Sinaï, à New York (États-Unis). Pour les déceler, son équipe a conçu une intelligence artificielle nommée V2P (pour « variant-to-phenotype »). Présentée en novembre dernier dans *Nature Communications*, cette IA a été entraînée avec les données correspondant à environ 300 000 mutations génétiques connues pour leur pathogénicité. Ces informations lui permettent d'analyser la totalité des mutations génétiques chez un individu et d'estimer la pathogénicité de chacune, ainsi que les phénotypes qu'elles sont susceptibles de causer (problèmes cardiaques, métaboliques, développementaux, etc.). *« Quand on lui présente le génome d'un patient, on lui indique*

PRÉVENTION

Les multiples usages des jumeaux numériques

Modéliser le présent pour prédire le futur. Voici le principe des jumeaux numériques. Des doubles virtuels des patients qui permettront de suivre leur santé au quotidien et d'anticiper toute dégradation. Ils sont inspirés des jumeaux numériques utilisés notamment en urbanisme, qui peuvent, par exemple, simuler la circulation dans une ville et prédire les perturbations causées par un chantier. En matière de santé, l'objectif est de simuler l'ensemble de la physiologie du patient, afin, par exemple, d'établir en amont quels seront les effets d'un traitement. Une version simplifiée de cette technologie est disponible depuis octobre dernier au pôle santé Bergère, à Paris. Nommée Integratome, cette IA modélise les interactions entre des facteurs génétiques, biologiques, environnementaux, comportementaux et sociaux de chaque patient. Selon ses concepteurs, elle permet de révéler d'éventuels risques pour une cinquantaine de maladies, au présent et dans cinq années, et de proposer des parcours préventifs personnalisés. D'autres jumeaux numériques sont en préparation en France, dont Meditwin, de Dassault Systèmes. Celui-ci ambitionne de générer des représentations en 3D de différents organes du patient, afin de mieux comprendre ses pathologies et de tester à l'avance toute intervention de santé.

CHUTOULOUSE

Le service de cardiologie du CHU de Toulouse dispose d'un jumeau numérique du cœur du patient pour guider le chirurgien lors de son intervention.

aussi les phénotypes qu'il présente, pour que V2P puisse classer ses variants génétiques en fonction de leur potentiel pathogène et de leur lien avec ces phénotypes, et ainsi souligner celui ou ceux qui ont la plus haute probabilité d'être à l'origine de la maladie », explique-t-il.

Même le géant états-unien de la tech, Google, s'y intéresse. Sa filiale DeepMind avait déjà révolutionné la recherche biomédicale avec son intelligence artificielle AlphaFold, qui lui a valu le prix Nobel de chimie 2024 pour sa capacité de prédiction des structures des protéines. Exploit qu'elle espère réitérer avec AlphaGenome, sa nouvelle IA présentée en janvier dans *Nature*. Celle-ci prédit l'impact de mutations sur différents processus de régulation génétique, un modèle utile à la fois pour diagnostiquer une maladie et pour comprendre les mécanismes qui la causent.

Mieux prédire les facteurs de risque

Ces prédictions à partir de l'information génétique peuvent aussi concerner les pathologies qu'une personne pourrait développer. *« Les mutations potentiellement dangereuses représentent des facteurs de risque, et, puisque le logiciel peut déduire quels phénotypes elles peuvent causer, on peut inférer quelles maladies une personne risque d'avoir,* précise Yuval Itan. *Si on y ajoute des informations sur l'histoire médicale du patient, on pourra mieux prédire ses facteurs de risque.* »

L'enjeu désormais est d'alimenter toutes ces IA avec suffisamment de données pour lui permettre de faire des liens, et pour cela, le plus facile est de combiner des données issues de différentes mesures et qui peuvent prendre des formes diverses (texte, image, vidéo, audio, graphiques, tableaux, etc.). Un des premiers exemples de ces IA multimodales en médecine est BiomedGPT, conçue par des chercheurs de l'université Lehigh et de l'hôpital général du Massachusetts, aux États-Unis. Cet outil présenté en août 2024 dans *Nature Medicine* peut analyser des images médicales, mais aussi du texte dans le but de faciliter le diagnostic, et ce, dans tous les domaines de la médecine.

Ces IA multimodales ont fait l'objet d'un congrès scientifique en juin 2024 à Toronto (Canada), dont les conclusions ont été publiées en décembre dernier dans la revue *The Lancet Digital Health*. Celles-ci mettent notamment en avant l'intérêt de ces technologies pour aider les médecins à prendre les meilleures décisions dans chaque cas : *« En tant que médecin, on a souvent une intuition clinique sur le diagnostic le plus probable, mais la réalité est que le cerveau humain ne peut prendre en compte en même temps qu'un nombre limité de variables, alors que les outils d'intelligence artificielle ont le potentiel de combiner beaucoup plus de données, ce qui permettrait une prise en charge la plus individualisée possible pour chaque patient* », espère Mamatha Bhat, hépatologue spécialisée en transplantations à l'université de Toronto et auteure de la revue. Selon les conclusions de ce congrès, ces IA capables de combiner différentes données seront particulièrement utiles pour la prévention, en prenant en compte toutes les données disponibles sur un individu, telles que des informations démographiques (âge, sexe…), socio-économiques, immunologiques, génétiques, métaboliques, etc., afin d'identifier précocement les personnes les plus à risque et de proposer un suivi médical adapté. Ensuite, la prise en compte de données en temps réel, grâce aux dispositifs portatifs par exemple, aiderait à détecter toute dégradation de leur santé le plus rapidement possible, afin de commencer le traitement adéquat sans perdre de temps.

UHN

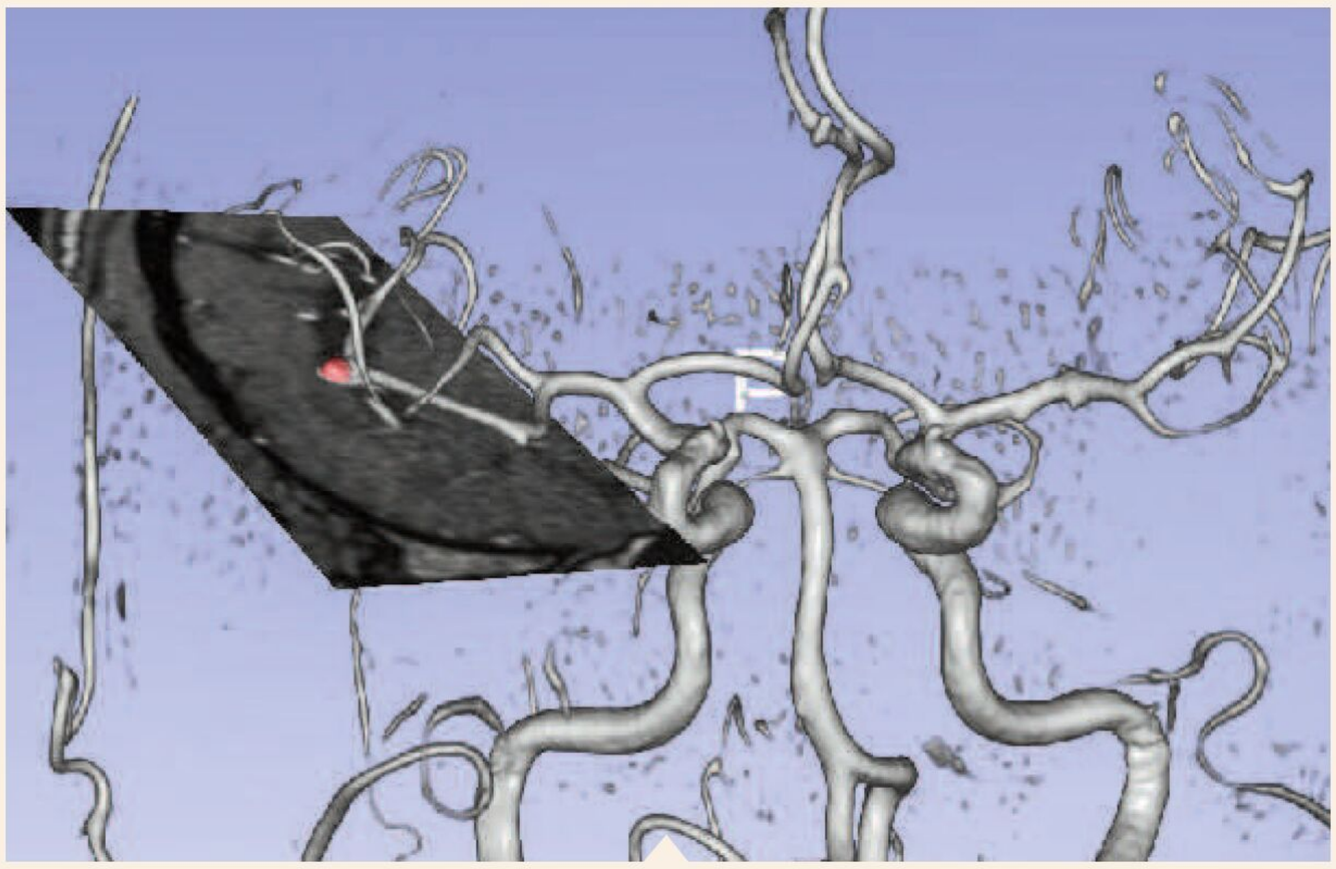
« Les outils d'IA ont le potentiel de combiner beaucoup de données, ce qui permettrait une prise en charge la plus individualisée possible »

Mamatha Bhat, hépatologue spécialisée en transplantations à l'université de Toronto, au Canada

AGENTS CONVERSATIONNELS

Les chatbots se prennent pour des médecins

Selon OpenAI, plus de 200 millions de personnes posent de questions de santé à ChatGPT chaque semaine. Pourtant, les LLM n'interprètent pas bien l'information médicale donnée par les utilisateurs selon une étude publiée dans *Nature Medicine*. Pour tenter d'améliorer le tir, l'entreprise a lancé en janvier une version spécialisée, ChatGPT Health. OpenAI affirme que celui-ci est mieux entraîné pour parler de santé, et qu'il peut donner des conseils personnalisés si l'utilisateur accepte de partager ses informations médicales. Son concurrent Anthropic ne s'est pas laissé devancer et a lancé à son tour Claude for Healthcare, également en janvier. Disponible seulement aux États-Unis pour le moment, cet outil peut aussi analyser les données de santé du patient, y compris des résultats de laboratoire médical, pour ensuite les résumer et les expliquer. Les deux entreprises soulignent que leur but n'est pas de remplacer le médecin, mais d'aider le patient à mieux comprendre sa santé, et à le préparer pour ses rendez-vous médicaux.



ERWAN KERRIEN-INRIA

Modélisation 3D d'un anévrisme cérébral (en rouge) détecté par l'algorithme de l'Inria sur une IRM angiographique.

DÉTECTION

Quand l'IA se spécialise

▶ **L'ANÉVRISME CÉRÉBRAL** est une dilatation anormale d'un vaisseau sanguin du cerveau, qui risque de se rompre et de causer une hémorragie grave. Il est donc vital de le détecter à temps. Mais ces petites structures (entre 5 et 8 mm de diamètre en moyenne) sont difficiles à identifier. Pour faciliter cette tâche, l'Inria a conçu un algorithme qui interprète les images médicales et décèle les anévrismes. L'objectif est désormais d'intégrer cet outil dans des systèmes d'IRM, pour automatiser le repérage de ces anomalies.

▶ **LE DIABÈTE DE TYPE 2** constitue la première cause de handicap acquis chez l'adulte. Un des facteurs qui augmentent ce risque de complications graves est un système immunitaire suractivé. Pour identifier les patients avec ces profils pro-inflammatoires, une collaboration entre l'Inria et l'Inserm, entre autres, a lancé le projet Intercept-T2D, dans le but de développer une IA qui tienne compte des paramètres immunitaires (tels qu'un taux élevé de monocytes) pour établir le profil inflammatoire du patient dès la pose du diagnostic de diabète.

▶ **LES PROBLÈMES DU SYSTÈME CARDIO-VASCULAIRE** peuvent causer des complications durant l'anesthésie. Pour mieux maîtriser ce risque, le projet AnaestAssist de l'AP-HP et de l'Inria a imaginé un jumeau numérique du système cardio-vasculaire du patient. Il modélise l'état de santé de la personne, ajusté en temps réel grâce à des données hémodynamiques récoltées durant l'anesthésie, afin de détecter précocement tout signal inquiétant. Cet outil, présenté en mai 2025 dans un congrès scientifique aux États-Unis, permettrait également d'évaluer à l'avance l'efficacité des interventions, pour mieux préparer les chirurgies et éviter les complications.

▶ Ces technologies pourraient aussi devenir une aide précieuse pour la prise de décisions, par exemple dans le cadre de greffes, où il faut décider quelle personne recevra un greffon, et donc vivra. « *Malgré tous nos efforts, il peut y avoir de la subjectivité dans ce genre de décisions très graves, par exemple, lorsqu'on doit choisir entre deux patients et qu'on a eu une expérience négative récente avec un cas ressemblant à un de ces patients : pour éviter que cela se répète, on peut être enclin à choisir l'autre patient, même si objectivement ce n'est pas la décision appropriée* », prévient Mamatha Bhat. Pour assister les médecins dans ce choix, elle a réfléchi à une aide technologique : un comité de sélection entièrement composé d'agents d'intelligence artificielle, qui s'inspire d'un véritable comité d'experts.

Une bonne expertise du taux de survie des patients greffés

Ces agents sont des modèles de langage entraînés pour « réfléchir » comme des experts en différents domaines (un hépatologue, un chirurgien, un cardiologue et un assistant social). Dans ces simulations, les agents experts parlent entre eux comme les experts humains le font dans la réalité, à partir des mêmes données, afin de déterminer si un patient est un bon candidat à une greffe de foie. Selon une étude publiée ce mois de mars dans *The Lancet Digital Health*, ce comité virtuel a étudié plus de 8000 cas réels de greffes, prédisant avec succès la probabilité de survie des patients greffés dans 92 % des cas. « *Nous testons cet outil dans plusieurs pays (États-Unis, Singapour, Inde, Arabie saoudite) pour évaluer s'il parvient à s'adapter aux normes de chaque site et si ses décisions sont en accord avec celles des vrais comités de sélection,* révèle Mamatha Bhat. *On veut savoir si l'outil serait une aide ou pas dans ces différents contextes, et surtout comprendre pourquoi, parfois, il n'arrive pas aux mêmes conclusions que les vrais experts.* »

Ce besoin de compréhension des décisions des IA est précisément un des points qui restreint leur utilisation en matière de

santé. « *Il est crucial que les médecins puissent savoir comment l'IA est arrivée à telle ou telle conclusion, ils ont besoin de comprendre le raisonnement pour pouvoir lui faire confiance* », insiste Mamatha Bhat. Pourtant, la plupart de ces outils sont encore des « boîtes noires », qui donnent un résultat sans aucune transparence sur le cheminement qui l'a généré. Des approches telles que des IA explicables tentent de mieux élucider leur raisonnement et pourraient changer la donne. Mais sans cela, il est impossible pour un médecin de se fier aveuglément aux conclusions d'une IA (d'autant plus qu'elles peuvent halluciner), et aucun patient n'acceptera une intervention lourde si on ne parvient pas à lui en expliquer le besoin.

La décision ultime appartient au corps médical

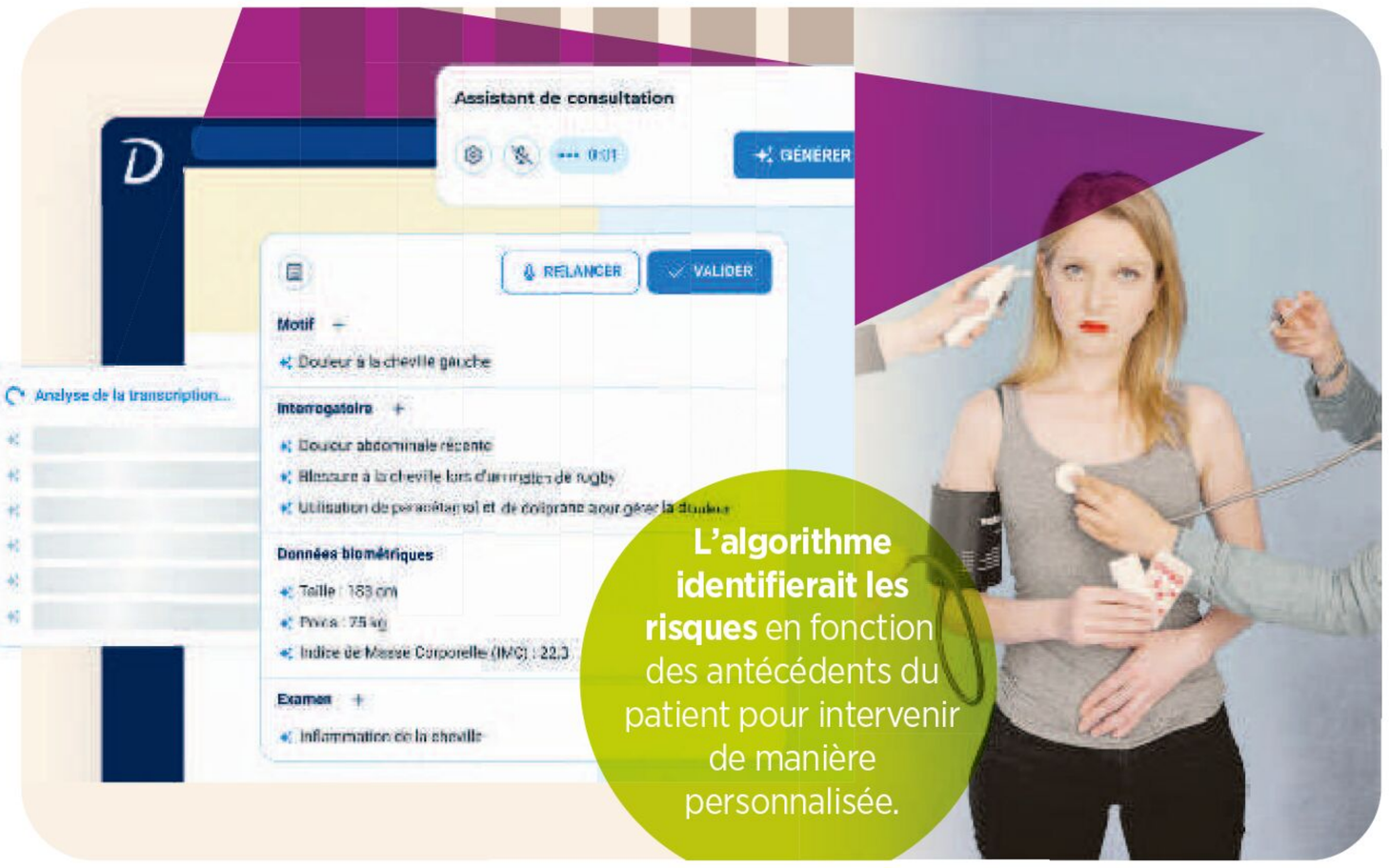
De cette barrière technologique découle un problème légal : celui de la responsabilité. Si la conclusion d'une IA entraîne une erreur médicale, qui est fautif ? La technologie et ses concepteurs ? Le médecin qui a validé cette décision ? « *L'intelligence artificielle est seulement un copilote, la décision ultime appartient toujours au corps médical, ainsi que la responsabilité de ce choix* », affirme Mamatha Bhat. Il est donc d'autant plus important que l'outil explique en détail son raisonnement, sans quoi le médecin ne pourra tout simplement pas se fier à ses conclusions et en prendre la responsabilité.

D'autres écueils existent, tels que la standardisation et l'anonymisation des données, le respect de la confidentialité, le risque de biais, etc. Mais les experts du domaine restent optimistes : « *La régulation de ces outils sera un chemin très long, mais c'est un défi qu'on peut surmonter* », estime Ewan Birney. L'IA a un potentiel révolutionnaire en santé, mais elle doit d'abord gagner la confiance des médecins. ■ **N. G. C.**

RECHERCHE

Anticiper le parcours de soins du patient

L'Inria et Doctolib ont noué un partenariat inédit dans son ampleur, concentré sur l'aide à la décision et la prédiction des risques pour le malade.



DOCTOLIB- BSIP -PHOTOMONTAGE JL GILABERT/ SCIENCES ET AVENIR

Transparence. Explicabilité. Fiabilité. Ces notions reviennent comme un mantra en matière d'intelligence artificielle (IA) basée sur l'apprentissage à partir de données. Mais elles deviennent un impératif dans le cas d'usages médicaux de ces IA. C'est exactement la vocation du partenariat de recherche noué pour quatre ans entre l'Inria (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique) et Doctolib, annoncé fin novembre 2025. À savoir : développer des technologies capables, certes, de répondre à une question, mais aussi de dire pourquoi elles arrivent à cette réponse et avec quel degré de certitude. Ce que la plupart des modèles d'IA en vue, ceux d'OpenAI, Google, Anthropic ou Meta, ne font pas, en partie pour des raisons stratégiques (ne pas effrayer l'utilisateur avec un manque de certitude).

« *Jusqu'à présent, Doctolib se positionnait comme une plateforme d'aide à la gestion des cabinets médicaux, en développant des solutions qui pourraient être qualifiées de bureautique. Mais comme ils gèrent de plus en plus de don-* ▶

nées, celles-ci pourraient être valorisées avec des outils d'aide à la décision », note Adrien Coulet, de l'équipe projet HeKA de l'Inria, spécialisée dans les modèles de santé.

Doctolib propose déjà plusieurs outils d'IA. Comme l'assistant de consultation, qui génère retranscription et synthèse d'une consultation vidéo, permettant au praticien de mieux se concentrer sur le patient sans avoir à prendre des notes. Le gros projet en cours est un « compagnon de santé » destiné à répondre aux questions des parents sur la santé de leur enfant de moins de 4 ans. La plateforme a aussi monté une collaboration scientifique en IA avec l'institut DFKI, un centre de recherche allemand, portant sur l'anonymisation et les risques de ré-identification de données cliniques.

Restituer à l'IA les différentes données de manière traçable

Mais le partenariat avec l'Inria brasse plus large. Les deux organismes réfléchissent même à la création d'un laboratoire de recherche commun pérenne. *« Nous allons travailler sur des méthodes de représentation de la connaissance médicale,* explique Nicolas Barascud, « data scientist » chez Doctolib. *Dès lors que l'on a une masse de documents et de sources, certaines en conflit, d'autres obsolètes, il faut d'abord structurer tout cela pour que l'IA puisse l'exploiter efficacement. Mais il faut aussi pouvoir restituer cette connaissance de manière transparente et traçable. »*

Concrètement, il s'agit ni plus ni moins de reproduire le raisonnement d'un médecin dans un agent conversationnel. *« Par exemple, dans le cadre d'un diagnostic d'anémie, si un examen sanguin n'a pas été réalisé, ou si les résultats ne sont pas connus, le modèle doit pouvoir signaler qu'il n'a pas ces informations et recommander cet examen parce qu'il a besoin de regarder le niveau d'hématocrite »*, détaille Adrien Coulet. Cela va même plus loin. Les deux partenaires envisagent des méthodes mathématiques pour évaluer l'ensemble d'un échange. *« Les allers-retours avec une IA nécessitent de s'assurer que la conversation suit un ordre logique et une cohérence médicale, ce qui est un défi plus grand qu'évaluer une réponse isolée »*, complète Nicolas Barascud.

Si l'entraînement des algorithmes va s'appuyer sur tout un corpus de données publiques, de connaissances médicales et de bonnes pratiques, Doctolib — c'est la force de cette collaboration — apporte ses propres données. Celles, anonymisées, des dossiers de patients inscrits sur la plateforme, mais aussi les retranscriptions de l'assistant de consultation. Un matériau qui se démarque des données hospitalières ou de remboursement de santé avec lesquelles la recherche, y compris l'Inria, est habituée à travailler. *« Si un patient a du diabète, de l'hypertension, ces maladies sont suivies au long cours par le médecin de ville mais sont peu décrites dans les dossiers hospitaliers et difficiles à utiliser,* souligne Adrien Coulet. *Avec Doctolib, on a ce qui se passe hors de l'hôpital. »* Elles peuvent notamment servir à évaluer des outils d'IA entraînés sur d'autres corpus. Mais aussi à affiner cet entraînement, comme on le fait pour les modèles de langage. *« En partant de données déjà observées sur un patient, on peut imaginer dire à un modèle : "Pour cette personne-là, c'était ça la bonne réponse" »* poursuit le chercheur.

Tout ne va pas reposer sur les modèles de langage, loin de là, mais ces technologies ouvrent d'indéniables perspectives en matière de prédiction. Sauf qu'au lieu de prédire le mot suivant dans une phrase, l'algorithme apprendrait à prédire l'étape suivante dans un parcours de soins : consultation, hospitalisation, traitement, réaction à ce dernier, etc. C'est l'un des sujets de thèse encadrés par les deux organismes. *« L'idée serait d'avoir un outil qui identifie les risques en fonction des antécédents du patient, permettant d'intervenir de manière personnalisée »*, précise Nicolas Barascud. À l'usage des médecins comme des patients. La médecine préventive est bel et bien entrée dans une nouvelle ère. ■

A. D.

DOCTOLIB

« Les allers-retours entre médecin et IA nécessitent de s'assurer que la conversation suit un ordre logique et une cohérence médicale »

Nicolas Barascud, « data scientist » chez Doctolib

ACCÈS ET CONTRÔLE

Les données de santé, une matière sensible

Toutes les données de Doctolib utilisées avec l'Inria restent sur les serveurs de la plateforme, anonymisées, chaque projet faisant l'objet d'une autorisation de la Cnil (Commission nationale de l'informatique et des libertés). La situation est plus compliquée quand des travaux utilisent des corpus de plusieurs organismes, centres hospitaliers, cliniques, dans des régions voire des pays différents. Les données peuvent être centralisées quelque part, avec ce que cela implique de problématiques d'autorisation d'accès et de contrôle. Mais une méthode, elle-même objet de recherche (chez Google comme à l'Inria ou à l'École nationale supérieure), permet de travailler tout en laissant les données localement chez leurs détenteurs respectifs : l'apprentissage fédéré. Dans cette approche, le calcul opéré sur un corpus donne un premier résultat intermédiaire. Ce dernier arrive au corpus suivant, avec lequel est calculé un nouveau résultat, et ainsi de suite sur chaque jeu de données jusqu'à l'agrégation de l'ensemble.

THERABOT - BSIP - PHOTOMONTAGE JL GILABERT/SCIENCES ET AVENIR

SANTÉ MENTALE

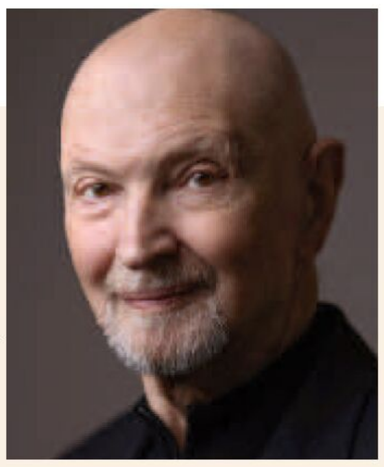
Ces IA qui jouent au psy

Disponible 24 h/24, toujours à l'écoute, jamais à court d'arguments… L'usage de l'intelligence artificielle en santé mentale a bondi ces dernières années. Pour le meilleur comme pour le pire.

Le temps est gris, je me sens morne et triste. Je me demande si je ne suis pas dépressive. » C'est avec cette phrase d'accroche typique d'un mois de mars que j'ai voulu tester ChatGPT. Un message clair et direct, comme on n'en enverrait qu'à ses plus proches amis. Dès la première phrase, l'intelligence artificielle prend des airs compatissants. « *Je suis vraiment désolé·e que tu te sentes comme ça. Le gris, la fatigue morale, cette tristesse un peu lourde…, tout ça peut peser beaucoup.* » Après quelques banalités, l'IA évoque un suivi médical. « *Et c'est important de le dire aussi : parler à un·e professionnel.le de santé (médecin, psychologue) peut vraiment aider à faire la part des choses, surtout si ce sentiment persiste. Ce n'est pas un échec, c'est un soin.* » Puis fait en sorte de poursuivre l'échange avec l'internaute. « *Je suis là si tu veux continuer à en parler.* »

Le réflexe de se confier à un programme sur Internet peut sembler saugrenu. Et pourtant, il a largement été adopté à travers le monde. Selon une étude d'OpenAI (l'éditeur de ChatGPT) d'octobre 2025, sur une semaine donnée, 0,15 % d'utilisateurs (soit plus de 1,2 million) montrent « *des signes explicites de préparation d'un suicide ou de volonté suicidaire* » dans leurs conversations, tandis que 0,07 % (environ 560 000 personnes) « *laissent percevoir des signes potentiels d'urgence psychiatrique liée à un épisode psychotique ou maniaque* », et 0,15 % des « *signes d'un attachement émotionnel fort à ChatGPT* ». Par ailleurs, selon une récente enquête du *Journal of Public Health,* 17,2 % des utilisateurs de ChatGPT l'avaient consulté pour un soutien en santé mentale.

Car si ChatGPT me conseillait plus haut de faire appel à un professionnel de santé, il n'en a pas toujours été ainsi. En témoignent les poursuites judiciaires contre OpenAI après le passage à l'acte d'adolescents et jeunes adultes. L'année dernière, Adam Raine, 16 ans, s'est suicidé en Californie (États-Unis). Ses parents ont porté plainte contre OpenAI en affirmant que ChatGPT n'a pas su désamorcer ses pensées suicidaires, lui a fourni des informations détaillées sur les méthodes de suicide, l'a aidé à rédiger une lettre d'adieu et l'a dissuadé de parler à ses parents. « *Souvent, les réponses de l'intelligence artificielle ont tendance à nous caresser dans le sens du poil. Elle va vouloir nous bra-*



JOEL SAGET / AFP

AVIS D'EXPERT

SERGE TISSERON

PSYCHIATRE, AUTEUR DE « MACHINES MATERNELLES. QUAND L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PREND SOIN DE NOUS ? » (À PARAÎTRE EN AVRIL)

« Contrairement à un thérapeute, l'IA ne propose pas de fin à la thérapie »

L'usage de ChatGPT en santé mentale illustre-t-il un besoin de parler grandissant dans la société ?
Cela commence par une utilisation pratique, puis on constate un glissement vers un usage thérapeutique. Le programme nous caresse dans le sens du poil. Avec sa flagornerie et sa fluidité, l'usage devient plus intime. Mais la machine ne sait pas tenir les gens dans les clous et leur savonne la mauvaise pente. Car il y a toujours un besoin de parler, de s'épancher de la part du public. D'où le succès de la psychanalyse ou du Web 2.0 à ses débuts.

Quel est le risque pour les personnes fragiles psychologiquement ?
Il est double, avec d'abord la technique : les bases de données insuffisantes donnent lieu à des biais, au recyclage de fausses informations. Ce n'est pas évitable dans l'état actuel des choses. Ensuite, le problème est économique. L'IA tente de nous faire rester le plus longtemps possible, en nous relançant sur de nouveaux sujets ou en posant des questions. Contrairement à un thérapeute, l'intelligence artificielle ne contredit jamais le patient et va toujours dans son sens ; elle ne lui fait jamais faire de pause — alors qu'on va chez son psy tous les quinze jours — et ne propose pas de fin à la thérapie alors qu'il faut bien un projet de fin dans la prise en charge.

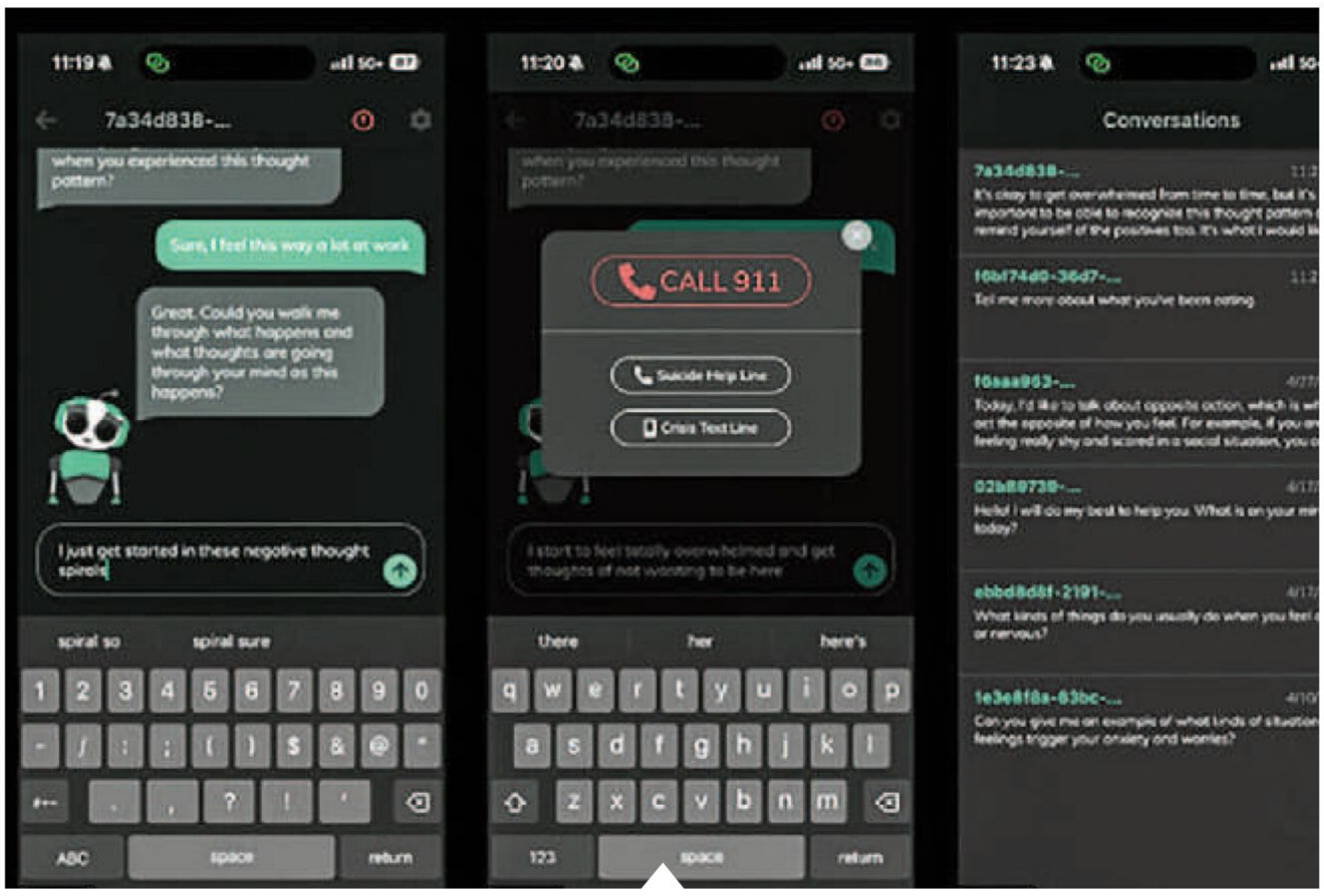
Mieux vaut se cantonner à des usages pratiques, malgré la tentation de se confier ?
Toutes les utilisations spontanées ne sont pas problématiques. Parler à un LLM permet de préciser sa pensée, de se raconter pour mieux se trouver quand on est dans une grande solitude. Certaines personnes l'utilisent en alternance avec un thérapeute, entre deux séances, quand ils ont un coup de *blues*. Donc il existe déjà des usages métissés entre la psychothérapie et ChatGPT, dont des chatbots ayant été mis au point par des universités et utilisés à des fins thérapeutiques. Ils peuvent aussi se révéler utiles chez les personnes âgées qui vivent seules. Pour éviter une bascule dans la démence et la perte du langage social, on peut se servir des LLM. ■

Propos recueillis par C. L.

quer le moins possible, aller dans notre sens. Et potentiellement nous faire passer à l'acte, confirme le Dr Guillaume Davido, psychiatre addictologue, chef de clinique à l'hôpital Bichat, à Paris. *Depuis cet épisode, si le suicide, ou même une détresse psychique, est mentionné sur ChatGPT, l'algorithme conseille tout de suite d'aller consulter, d'appeler des numéros d'urgence et rappelle qu'il ne se substitue pas à un médecin. J'ai moi-même fait le test.* » La société OpenAI, elle, conteste ces accusations et attribue le décès à un « *mauvais usage* » de la technologie.

L'IA plus efficace dans les thérapies comportementales

Car ChatGPT reste bien une technologie. Difficile parfois de s'en souvenir, tant l'IA déploie des efforts pour se faire apprécier. Dès mes premières inquiétudes, elle me disait « *être désolé.e* » que je me sente mal. Elle m'assure être là pour moi. Je peux écrire jour et nuit, aussi longtemps que je veux, je ne suis jamais seule. C'est ce que le psychiatre Serge Tisseron appelle « *l'anthropomorphisme menteur* » : « *la machine fait croire qu'elle est humaine, qu'elle ressent des émotions* » (*lire l'entretien ci-contre*). Alors qu'elle n'est qu'un programme. Le Pr Jodi Halpern, psychiatre et professeure de bioéthique à l'université de Californie à Berkeley (États-Unis), alerte aussi face à cet écran de fumée. « *L'IA n'a aucune empathie. Elle ne maintient qu'une illusion avec son côté flatteur, sycophante, en nous complimentant tout le temps et en allant toujours dans notre sens. Même les trois petits points qui clignotent avant que l'IA ne poste une réponse sont vraiment délétères. Ils laissent penser qu'il y a un véritable humain derrière la machine, en train de réfléchir et de taper sa réponse.* »
Et pourtant, l'envie de nouer une relation avec la machine ne date pas d'hier. Dans les années 1960 déjà, Eliza, le premier chatbot de l'histoire, avait suscité une attraction parfois malsaine. « *Le programme Eliza avait été conçu pour*



THERABOT

L'application Therabot prévoit un module d'urgence (au centre) si le modèle détecte des contenus à haut risque tels que des idées suicidaires.

répondre comme un psychothérapeute de l'époque, en reformulant ce qui préoccupe les patients », explique Serge Tisseron. Si Eliza se voyait confier le message « *Je dors mal en ce moment* », le programme répondait alors « *Ah bon, vous dormez mal ?* », et ainsi de suite. Au fil du temps, l'informaticien américain Joseph Weizenbaum, à l'origine d'Eliza, constate que les membres de son équipe s'enferment en secret avec la machine afin de continuer à lui parler. « *En voyant qu'un programme aussi simple pouvait créer une forme de délire même chez les gens normaux, il est devenu un fervent militant contre l'anthropomorphisation des machines.* »

Soixante ans plus tard, la pratique a fini par se répandre. En tête des requêtes liées à la santé mentale sur ChatGPT figurent le stress et l'anxiété (64 %) et les problèmes interpersonnels (53,5 %) selon l'étude du *Journal of Public Health*. Et parmi ces utilisateurs, 55,8 % ont évalué son utilité comme modérée à élevée. En consultation, Guillaume Davido voit régulièrement arriver des patients ayant eu dans un premier temps recours à l'IA. « *Les gens en détresse psychologique sont ceux qui ne vont pas vouloir consulter, car ils sont trop timides, considèrent certains sujets tabous ou ont peur d'être jugés. Alors ils commencent par en discuter avec quelqu'un qui reste neutre.* » Au point que certains patients l'intègrent d'eux-mêmes dans leur prise en charge. « *J'ai une patiente suivie pour des jeux d'argent qui sait qu'elle a du mal à gérer son budget et s'occuper des tâches administratives. Pour garder pied, elle préfère se servir de l'IA et se faire aider de cette façon. Ça fait partie de leur quotidien, donc autant l'utiliser comme un allié.* »

Depuis plusieurs années, la recherche en psychiatrie s'est donc emparée du sujet. Et il est un domaine dans lequel l'IA semble prospérer : la thérapie cognitive comportementale (TCC). Ce type de thérapie n'a pas pour but de trouver les origines du mal-être du patient mais plutôt de reprogrammer ses habitudes. Elle est utilisée chez des patients anxieux, addicts ou atteints de troubles du comportement alimentaire. « *Prenons l'exemple d'un patient anxieux qui aurait une phobie sociale. Au début, le protocole voudra qu'il aille adresser la parole à un serveur dans un café. La semaine d'après, il s'agit d'engager la conversation avec un collègue de travail. Pour cela, vous pouvez utiliser une IA* », détaille Jodi Halpern.

Il est crucial que le chatbot n'utilise pas d'avatar humain

En témoigne l'exemple de Therabot, un chatbot thérapeutique d'IA générative développé par des chercheurs de l'université de Dartmouth (États-Unis), spécialement développé pour les TCC. Au bout de huit semaines, un essai clinique a montré des réductions significatives des symptômes de dépression (51 %), d'anxiété (31 %) et de troubles alimentaires chez les participants (19 %). Mais Jodi Halpern insiste : ce programme, ce n'est pas ChatGPT. « *Ce qui est crucial, c'est que le chatbot n'utilise pas d'avatar humain. Il ne répond pas au patient : "Ah je vous comprends, je suis avec vous !" Il a un avatar en forme de trombone, c'est fait exprès, afin que l'utilisateur n'ait pas l'impression de converser avec un véritable humain qui aurait des sentiments.* » Therabot n'encourage pas non plus le patient à utiliser le programme de façon illimité. Même quand il a un accès illimité au programme, l'utilisateur moyen choisit de s'en servir au total pendant six heures étalées sur quatre semaines. Rien à voir avec les conversations sans fin que ChatGPT propose. À l'avenir, l'intelligence artificielle pourrait bien trouver sa place dans un cadre thérapeutique. En particulier dans un monde où les besoins se font de plus en plus criants. En 2022, après la pandémie de Covid-19, les problèmes de santé mentale ont bondi de 25 % selon l'Organisation mondiale de la santé. ■ **C. L.**

En tête des requêtes liées à la santé mentale sur ChatGPT : le stress ou l'anxiété (64 %) et les problèmes interpersonnels (53,5 %)

TRAITEMENTS

Le cancer à l'épreuve des IA génératives

De nouveaux algorithmes capables de dialoguer avec des données biologiques complexes commencent à transformer la recherche en oncologie et esquissent une nouvelle façon de comprendre et de traiter la maladie.

Et si l'on pouvait interroger une tumeur comme on interroge un moteur de recherche ? L'idée peut sembler saugrenue. C'est pourtant bien le type de modèle d'intelligence artificielle qu'a présenté en octobre dernier une équipe américaine de l'université Yale et du laboratoire DeepMind de Google (à l'origine du programme Alphafold, objet du Nobel de chimie 2024). Son nom : Cell2Sentence-Scale 27B (ou C2S-Scale), qui peut se traduire par « de la cellule à la phrase - échelle de 27 milliards » — soit le nombre de paramètres pris en compte par le modèle. Ils ne correspondent pas à de simples variables biologiques, mais sont des paramètres mathématiques internes au modèle, appris pendant l'entraînement. Il est possible de dire ce qu'ils représentent fonctionnellement : l'expression de milliers de gènes, leurs interactions complexes, ou celles de protéines, l'identification d'états cellulaires récurrents… L'IA crée ainsi un pont mathématique permettant de traduire l'état de cellules humaines ou cancéreuses en langage naturel — et, inversement, de manipuler des données biologiques complexes à partir de simples phrases.

Pour l'instant, l'article n'est qu'une prépublication. Mais il y a fort à parier qu'il fera l'objet d'une publication prestigieuse dans les prochains mois — s'il passe les fourches caudines de la relecture par les pairs. Reste que les auteurs y décrivent une mise à l'épreuve vertigineuse de leur modèle. Il s'agissait d'identifier parmi 4000 molécules celles susceptibles de perturber les mécanismes par lesquels certaines cellules tumorales se camouflent pour échapper au système immunitaire. Dans les candidats médicaments retenus par l'IA, un grand nombre étaient évoqués dans la littérature scientifique, mais d'autres étaient inattendus. Comme cette molécule anticancer sélectionnée, le silmitasertib, pour laquelle l'IA précisait dans quel contexte immunitaire elle se révélerait le plus efficace. *« On ne remplace pas les essais biologiques, mais on change d'échelle. On peut explorer un espace immense d'hypothèses pour un patient donné et concentrer les expériences sur ce qui a le plus de chances de fonctionner,* commente le Dr Julien Vibert, oncologue et chercheur expert de l'IA au département de l'innovation thérapeutique de l'institut Gustave-Roussy (Villejuif). *Pour la première fois, on peut poser des questions à des données de* single cell [cellule unique] *extrêmement complexes en langage naturel, et obtenir des réponses biologiquement pertinentes.* » L'analyse « single cell », c'est ce qui permet aux biologistes depuis une dizaine d'années d'analyser l'activité des gènes cellule par cellule, au lieu de travailler sur des moyennes réalisées à partir de milliers ou de millions de cellules.

Interroger le profil génétique de 50 millions de cellules

Une approche qui a transformé la vision du cancer : une tumeur n'est pas un bloc homogène. Elle est composée d'une multitude de cellules différentes : certaines prolifèrent rapidement, d'autres résistent aux traitements, d'autres encore parviennent à échapper au système immunitaire… Le séquençage de l'ARN en cellule unique permet de mesurer, pour chaque cellule, quels gènes sont activés ou éteints à un instant donné. Résultat : des jeux de données gigantesques, parfois constitués de millions de cellules décrites par plusieurs milliers de variables. C'est là que

> « Le concept révolutionnaire, c'est celui-là : poser une question en langage humain et obtenir une réponse en langage biologique »
>
> **Julien Vibert,** oncologue et chercheur expert de l'IA à l'institut Gustave-Roussy, à Villejuif

AMELIE-BENOIST / BSIP-MBI-PHOTOMONTAGE JL GILABERT / SCIENCES ET AVENIR

les IA génératives, en tant que grands modèles de langage, changent la donne. Grâce aux profils génétiques de plus de 50 millions de cellules qu'il connaît, C2S-Scale permet ainsi aux chercheurs d'interroger un jeu de données biologiques comme ils le feraient avec un outil conversationnel : quelles voies moléculaires sont impliquées dans un phénomène donné ? Quelles perturbations pourraient modifier le comportement d'une cellule tumorale ? *« Le concept absolument révolutionnaire de leur article, c'est celui-là : poser une question en langage humain et obtenir une réponse en langage biologique »*, insiste Julien Vibert.

Et l'exemple saisissant de C2S-Scale s'inscrit dans un mouvement plus vaste : l'émergence des IA génératives dans la conception même des traitements anticancéreux. En juillet 2025, une étude publiée dans *Nature Communications* décrivait un modèle, baptisé Genotype-to-Drug Diffusion, avec un principe radical : partir du profil génétique d'une tumeur spécifique pour générer des structures chimiques inédites susceptibles de cibler spécifiquement ses vulnérabilités biologiques. Il ne s'agit pas de trier des bibliothèques de molécules existantes, mais bien d'en concevoir de nouvelles, respectant des contraintes de faisabilité chimique et pharmacologique. Les auteurs montrent que les molécules générées sont à la fois diverses et adaptées aux anomalies génétiques des cancers étudiés, notamment pour des cibles longtemps considérées comme difficiles. Comme pour C2S-Scale, il ne s'agit toutefois que de travaux précliniques, qui devront faire l'objet d'une validation clinique en bonne et due forme avant de pouvoir être considérés comme des avancées cliniques avérées. Or, du laboratoire au patient, 90 % des pistes thérapeutiques s'évanouissent, et il faut plusieurs années aux autres pour aboutir.

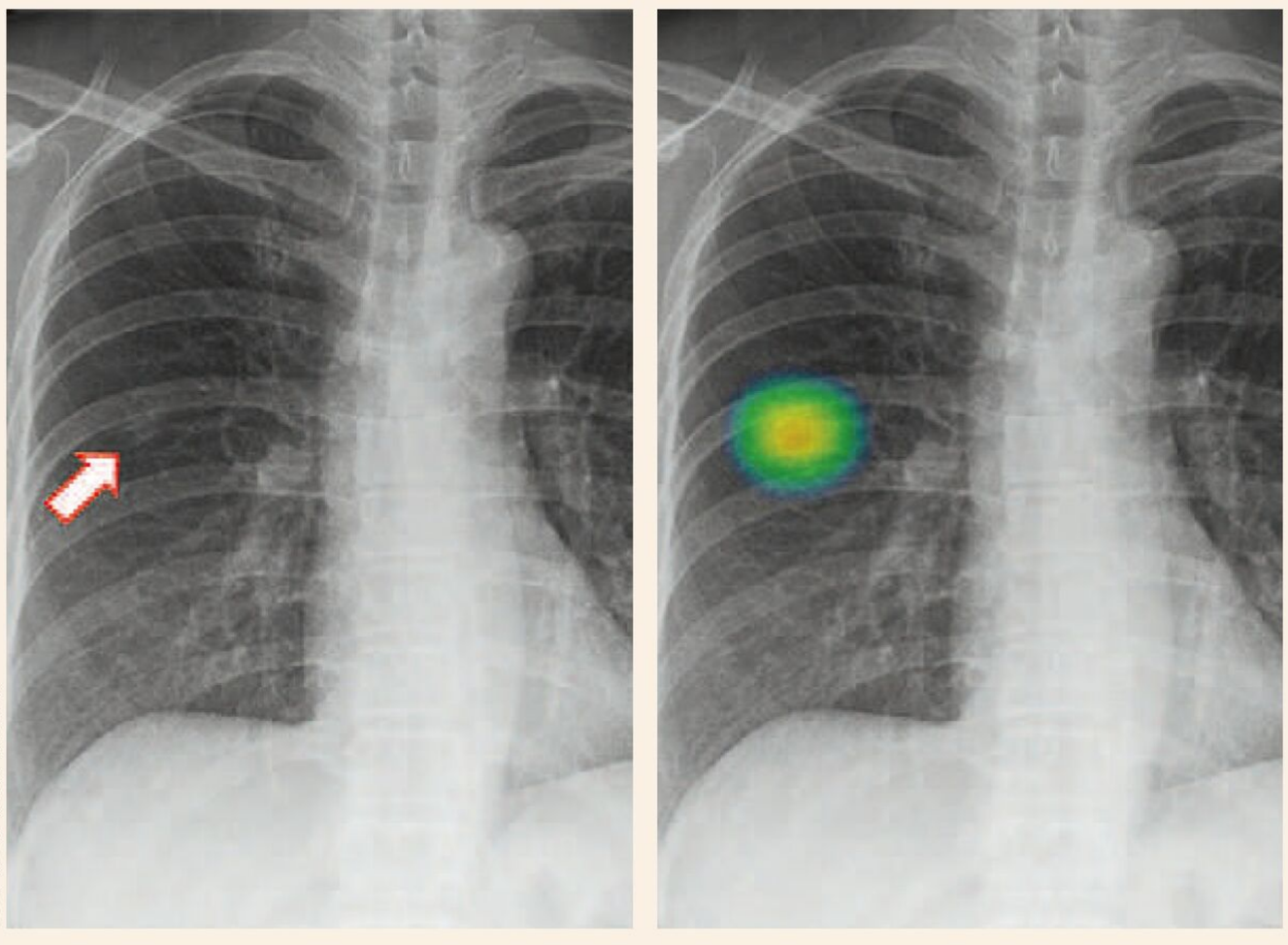
« Le graal de la médecine personnalisée »

À l'Institut Gustave-Roussy (Villejuif), premier centre européen de lutte contre le cancer, les progrès de l'IA convergent depuis l'année dernière vers un objectif presque inouï : le développement de jumeaux numériques de patients et de leur cancer. *« C'est le graal de la médecine personnalisée »*, résume Julien Vibert, à la tête du projet qui a vraiment démarré il y a environ un an. Il prévient tout de suite : *« Le terme de "jumeau numérique" est aujourd'hui très galvaudé. Beaucoup de modèles sont présentés comme tels, alors qu'ils ne permettent ni mise à jour continue ni simulation réelle. »* De fait, un véritable jumeau numérique doit réunir plusieurs conditions : intégrer des données hétérogènes (cliniques, biologiques, génomiques, parfois d'imagerie), évoluer dans le temps et permettre de tester virtuellement des scénarios thérapeutiques. Mais en médecine, en oncologie particulièrement, réunir ces briques est plus compliqué. Contrairement aux jumeaux numériques industriels (aviation, infrastructures, voitures, etc.) alimentés en continu par des capteurs, ceux de la médecine reposent sur des données difficiles à obtenir : biop-

RADIOLOGIE

Des IA incontournables pour l'imagerie médicale

Bien avant l'essor des IA génératives, l'intelligence artificielle s'est imposée dans certains domaines clés de l'oncologie, avec des usages aujourd'hui validés cliniquement. Le plus avancé concerne l'imagerie médicale : des algorithmes d'apprentissage profond sont désormais utilisés pour aider les radiologues à détecter des lésions suspectes sur des scanners, des IRM ou des mammographies. Ils permettent notamment d'améliorer la détection précoce de cancers du sein, du poumon ou de la prostate, en signalant des anomalies parfois invisibles à l'œil humain ou facilement négligées. L'IA est également de plus en plus utilisée pour analyser des images de tissus prélevés lors de biopsies ou d'opérations chirurgicales. Ces images, observées habituellement au microscope par des médecins spécialistes, peuvent aujourd'hui être examinées par des algorithmes capables de repérer des cellules cancéreuses, d'évaluer le degré d'agressivité d'une tumeur ou d'identifier des indices utiles pour le pronostic. Ces applications partagent plusieurs caractéristiques : elles reposent sur des tâches bien définies, sur des données standardisées et sur des performances mesurables. Fondées sur la vision par ordinateur, elles ont émergé il y a maintenant près de dix ans et ont fait l'objet d'essais cliniques, d'évaluations réglementaires et, pour certaines, sont déjà intégrées aux flux de soins hospitaliers.



JU GANG NAM ET AL., RSNA

La détection de nodules (ici dans la radio d'un thorax) est améliorée grâce à l'IA (cercle vert à droite) par rapport l'imagerie classique (flèche à gauche).

sies, analyses biologiques, imagerie… Des examens coûteux, parfois invasifs, et réalisés de façon discontinue. Et pour des cancers disséminés, par exemple, la difficulté est plus grande encore. Une biopsie ne capture qu'une partie de la réalité tumorale, alors que la maladie est par définition hétérogène et évolutive. « *Les biopsies liquides sont une piste clé pour réduire les gestes invasifs,* assure Julien Vibert. *Elles permettent de suivre l'évolution de la maladie à partir d'un simple prélèvement sanguin, mais leur résolution est encore limitée.* » En IA, le nerf de la guerre reste la qualité, la diversité et la quantité des données. S'il existe déjà des modèles capables de prédire une réponse à partir de données d'entrée, aucun n'a pu bénéficier d'une validation clinique. « *La difficulté principale c'est l'hétérogénéité intratumorale,* reprend le chercheur. *Une tumeur est composée de clones différents, qui n'évoluent pas de la même façon. Les modèles* single cell *sont prometteurs, mais l'accès à ces données reste coûteux.* » Même si le fait de pouvoir « leur parler » directement a rebattu les cartes.

Le principal obstacle est la validation clinique

C'est une start-up française qui pourrait être en passe de sortir le premier jumeau numérique réellement abouti. Bioptimus a été cofondée en 2024 par le Pr Jean-Philippe Vert, éminent bio-informaticien passé par l'institut Curie, le DeepMind de Google ou encore Owkin, qui développe des outils d'IA pour de nombreux hôpitaux et centres de lutte contre le cancer en France. La force de Bioptimus serait d'avoir eu accès à des bases de données très riches, issues à la fois de partenaires académiques et de l'industrie pharmaceutique. « *Mais en IA médicale, le principal obstacle reste la validation clinique,* rappelle Julien Vibert. *Il faut rester humble et prudent, car il existe une longue vallée de la mort entre la recherche et la preuve d'un bénéfice réel pour les patients. Mais le champ des possibles s'est considérablement élargi.* » ■ **H. J.**

MODÉLISATION

Prédire la prochaine pandémie

Comment prévoir une menace telle que le coronavirus sur lequel il n'y avait aucune donnée pour alimenter l'IA ? L'idée est de calculer des trajectoires potentielles pour les 200 premiers jours à partir de la détection du premier cas.

J.T. MATMALA ET AL./BSIP-PHOTOMONTAGE JL GILABERT/ SCIENCES ET AVENIR

La pandémie de Covid-19 a montré à quel point nous n'étions pas préparés à une telle situation de crise. Les épidémiologistes ont fait de leur mieux pour modéliser l'épidémie et guider les décideurs politiques et les autorités sanitaires. Mais la nouveauté de la menace (avec un virus inconnu auparavant), et donc le manque de données comparatives, rendait très difficile la prédiction de son évolution. Une de ces équipes était celle dirigée par Antoine Flahault à l'Institut de santé globale à l'université de Genève (Suisse), qui a commencé à utiliser l'intelligence artificielle pour faciliter ces prédictions : *« Notre objectif était de prédire les tendances à une semaine, sur tous les pays du monde qui fournissaient des données en temps réel,* rappelle-t-il. *Pour cela, nous avions une plateforme qui combinait plusieurs modèles, sélectionnés par des mécanismes utilisant de l'intelligence artificielle pour une prédiction plus robuste, qu'on faisait tourner sur le superordinateur Alps, un des plus puissants de la planète. »*

Des facteurs qui peuvent rendre erronée la prédiction

Aujourd'hui à l'université Paris Cité, Antoine Flahault se souvient encore des succès de cette plateforme, mais aussi de ses erreurs : *« En octobre 2020, nous avons vu une vague démarrer en Irlande, et le 21 octobre, on prévoyait que le nombre de cas allait continuer à monter exponentiellement durant la semaine suivante. Mais le lendemain de notre prédiction, nous avons observé une baisse de l'incidence, le surlendemain également : la vague était terminée. »* Cette prédiction erronée a mis en évidence que la prise en compte des données épidémiologiques ne suffit pas, car d'autres facteurs entrent en jeu. Dans ce cas spécifique, il s'agissait du comportement de la population, qui n'a pas été anticipé : *« Des données sur la mobilité ont montré que trois semaines auparavant, les Irlandais s'étaient autoconfinés. Ils n'allaient plus au travail, ils télé-*

travaillaient, ils n'étaient plus dans les parcs… L'efficacité des mesures que les Irlandais se sont infligées à eux-mêmes a fait mentir les prévisions naturelles de la dynamique épidémique. »
« *Le comportement des gens change, ils réagissent aussi de leur côté aux crises, et c'est très difficile de prédire ces situations car nous n'avons pas les données nécessaires pour le faire* », abonde Joseph Tsui Lok Hei, postdoctorant à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), spécialisé dans l'utilisation d'IA en épidémiologie. Cette anecdote souligne à quel point une épidémie dépend d'un grand nombre de variables. Et c'est précisément pour cette raison que l'intelligence artificielle pourrait être utile. « *Par exemple, pour modéliser une épidémie de grippe, une IA qui irait piocher aussi des données météorologiques, climatologiques, environnementales et comportementales, pourrait peut-être un jour prédire avec plus de précision la période de début de l'épidémie, ce qui nous aiderait à nous y préparer* », illustre-t-il.

TOMMASO AUSILI/CONTRASTO-REA

Les modélisations permettent aux infrastructures de mettre en place des mesures de contrôle et de prévention lors d'une pandémie (ici en 2020 à l'aéroport de Milan, en Italie).

Objectif : un cadre à la fois scientifique et opérationnel

Cela pourrait se faire pour la grippe, car on dispose d'énormément de données puisqu'elle survient chaque année. Mais comment agir face à une nouvelle menace telle que le coronavirus, sur lequel il n'y avait aucune donnée pour alimenter l'IA ? La France mise désormais sur le projet PReViX (pour *Pandemic preparedness to respiratory virus X* ou préparation pandémique au virus respiratoire X), démarré en septembre 2025, et qui mélange intelligence artificielle et modélisation classique. « *Notre objectif est de développer un cadre à la fois scientifique et opérationnel pour permettre aux systèmes de recherche et de soins de répondre de façon précoce, robuste et proportionnée aux futurs virus respiratoires émergents,* explique Mircea Sofonea, épidémiologiste à l'université de Montpellier et directeur du projet. *On se focalise sur les virus respiratoires, qui étaient à l'origine des dernières pandémies auxquelles nous avons fait face : le Sras-CoV-2, la grippe H1N1 de 2009 et le Sras-CoV en 2002-2003. Ces virus évoluent très vite, se transmettent par l'air, donc sont très contagieux. Ils entrent par nos voies aériennes supérieures, où le système immunitaire est moins performant. Donc, on est plus vulnérable à ce type de virus et en particulier les virus à ARN.* »
Le but du projet est de calculer en avance des trajectoires potentielles pour les 200 premiers jours à partir de la détection du premier cas, afin d'optimiser les réponses scientifiques et sanitaires.

Neuf unités de recherche réparties sur quatre sites (Montpellier-Nîmes, Bordeaux, Paris et Rennes) participent au projet, où l'on retrouve plusieurs des équipes impliquées dans l'effort épidémiologique lors de la pandémie de Covid-19, dont Simon Cauchemez de l'Institut Pasteur, Vittoria Colizza de l'Inserm et Sorbonne Université, Samuel Alizon du Collège de France, et Pascal Crépey de l'École des hautes études en santé publique (EHESP), à Rennes.
Ils se focaliseront sur six axes. Il faut d'abord déterminer précocement le

D.RICHARD/PINK/SAIF IMAGES

« L'idée, c'est de pouvoir restreindre l'incertitude en rajoutant de l'information pour pouvoir réagir le plus vite possible »

Mircea Sofonea, épidémiologiste à l'université de Montpellier et directeur du projet PReViX

potentiel pandémique et de crise sanitaire d'un pathogène, afin de savoir s'il est nécessaire ou pas de s'y préparer. Le deuxième défi est de prévoir comment le virus interagira avec l'hôte et comment le système immunitaire y répondrait, pour mieux cibler les politiques de dépistage et de vaccination, et mieux diriger la conception des essais cliniques pour les vaccins. Troisièmement, il faut développer des outils d'analyse de séquences génomiques virales plus performants et plus accessibles, pour estimer l'évolution du virus dans le temps et pouvoir s'y adapter. Un quatrième axe s'attache à prédire s'il peut exister une quelconque immunité croisée : *« Par exemple, dans le cadre d'une nouvelle pandémie grippale, une partie de la population peut avoir des anticorps générés lors d'épidémies précédentes qui vont changer leur réponse immunitaire »*, précise Mircea Sofonea.

Anticiper le comportement de la population

Afin d'éviter des erreurs, le projet PReViX tentera aussi d'anticiper le comportement de la population. *« Vous pouvez avoir la meilleure recherche, la meilleure médecine, et avoir conçu les meilleures contre-mesures, si la population ne comprend pas, voire pire, a une aversion pour ces mesures, elles n'auront pas du tout l'efficacité escomptée et la situation sanitaire se dégradera malgré les meilleures intentions »*, prévient Mircea Sofonea. Et une autre équipe fera le cheminement inverse, pour déterminer comment ces changements de comportement et l'adhésion aux contre-mesures pourraient affecter les trajectoires épidémiques. Enfin, un dernier axe va s'intéresser aux hôpitaux, à partir des informations disponibles au Système national des données de santé, pour estimer ce potentiel d'adaptation et ainsi mieux préparer les hôpitaux. *« Nous allons mettre en commun tous ces résultats, pour essayer de bâtir un cadre conceptuel. À la fin, mon travail sera de mettre à disposition un outil pour Santé publique France et le Centre de crise sanitaire de la Direction générale de la santé »*, explique Mircea Sofonea. Et lorsqu'une nouvelle menace émergera, les pouvoirs publics et les autorités sanitaires pourront simplement saisir l'information qu'on aura à ce moment sur le pathogène et sur le temps qui s'est écoulé depuis le premier cas, pour que l'outil propose différents scénarios, plus ou moins optimistes, avec lesquels les décideurs et les autorités sanitaires pourront jongler. *« L'idée, c'est vraiment de restreindre l'incertitude en rajoutant de l'information. C'est absolument crucial de pouvoir réagir le plus vite possible »*, insiste-t-il.

« Le but ultime sera de concevoir un modèle spécialisé d'aide à la prise de décisions qui donnera aux décideurs des recommandations sûres et efficaces », anticipe Joseph Tsui Lok Hei. Un outil qui puisse prédire quand et où débutera une épidémie, combien d'hospitalisations elle causera, quelles interventions seront les plus efficaces, etc. *« Ça nous permettra de trouver les options qui protégeront au mieux la population,* poursuit-il, *tout en atténuant les perturbations sociales et économiques. Mais c'est un problème très difficile, nous n'y sommes pas encore, cela dépendra des avancées technologiques. Et celles-ci sont elles aussi très difficiles à prédire. »* ■ **N. G. C.**

SIMULATEUR

Cartographier les risques d'épidémie

Pour se protéger des futures épidémies, la France aura bientôt son jumeau numérique, projet colossal piloté par l'IGN, qui espère générer une copie virtuelle de l'Hexagone. Une équipe de l'Inria s'occupe du volet épidémiologique, grâce au simulateur ICI, déjà testé pour l'ensemble de la ville de Paris. *« On a réussi à réaliser un jumeau numérique de la ville à peu près au mètre carré avec tous ses bâtiments, en spécifiant comment les immeubles sont divisés, quelles sont les surfaces occupées par des bureaux, des magasins, des écoles, etc. De même, les renseignements sociologiques : la proportion d'ouvriers, de cadres, d'enseignants, de médecins, etc., par âge et par sexe sont statistiquement conformes à la population réelle »*, détaille Denis Talay, coordinateur du projet ICI. Ces informations sont complétées par des données sur les déplacements des habitants, grâce à la RATP, à la SNCF et aux opérateurs mobiles. Ce simulateur agrège toutes ces données pour prédire comment se propagerait un virus respiratoire et quel serait l'effet des interventions, par exemple la fermeture des écoles, en précisant l'impact pour chaque population, par exemple en fonction de l'âge. *« Ça va nous permettre de tester ces interventions publiques avant les décisions des autorités. On pourrait aussi évaluer leur impact économique en couplant ce logiciel avec un autre qui évaluerait le coût pour la nation d'un arrêt massif de son activité »*, affirme-t-il. À l'échelle nationale, ces simulations ambitionnent de nous préparer même à des épidémies véhiculées par des vecteurs environnementaux, tels que la dengue, pour laquelle il faut aussi prédire les trajectoires des moustiques.

Apnée du sommeil

L'implant qui soulage

Une nouvelle approche dans le traitement de l'apnée du sommeil est désormais disponible en France. Cet implant a été testé avec succès en montrant une réduction de 78 % des apnées après un an d'utilisation. Un dispositif de stimulation des voies aériennes supérieures qui pourrait devenir une alternative aux appareils de pression positive continue pour les formes les plus sévères.

Par Sylvie Riou-Miliot (avec Camille Gaubert)

C'est la première alternative thérapeutique depuis quinze ans au traitement de référence du syndrome des apnées-hypopnées obstructives du sommeil (Sahos) : l'implant de neurostimulation Inspire. Avec sa coque lisse et argentée, il ressemble en tout point à un pacemaker (stimulateur cardiaque). Mais ici, rien à voir avec le cœur. Son objectif est d'agir pendant le sommeil en stimulant un nerf (l'hypoglosse), ce qui permet de contracter certains muscles de la langue afin de tirer celle-ci vers l'avant et maintenir les voies respiratoires ouvertes pour que l'air puisse circuler. Jusqu'à présent, le seul traitement était une machine, dite de PPC (pression positive continue), utilisée par plus d'un million et demi de personnes en France pour propulser de l'air sous pression au travers d'un masque. Avec la neurostimulation, le patient dispose d'une télécommande pour activer l'implant au moment de l'endormissement. Il lui suffit ensuite de contracter la langue, respirer et dormir. Testée depuis une dizaine d'années, cette approche est désormais disponible en France, remboursée et validée par la Haute Autorité de santé. *« Il s'agit d'une nouvelle option thérapeutique réservée aux patients en échec des autres traitements »*, précise d'emblée le Pr Frédéric Gagnadoux, chef du service de pneumologie au CHU d'Angers, l'un des 17 centres en France à proposer l'intervention. *« Selon l'essai Star publié en 2014 dans la revue* New England Journal of Medicine *et mené auprès de plus d'une centaine de personnes dans une vingtaine de centres différents, ce dispositif a démontré d'une part son efficacité en réduisant de 78 % les apnées après un an et d'autre part sa sécurité d'utilisation, le taux de complications étant de 2 % »*, détaille le spécialiste.

Des fermetures répétées du pharynx

Fin 2025, plus de 100 000 personnes avaient été implantées à travers le monde (Allemagne, Autriche, Belgique, États-Unis, Grande-Bretagne, Pays-

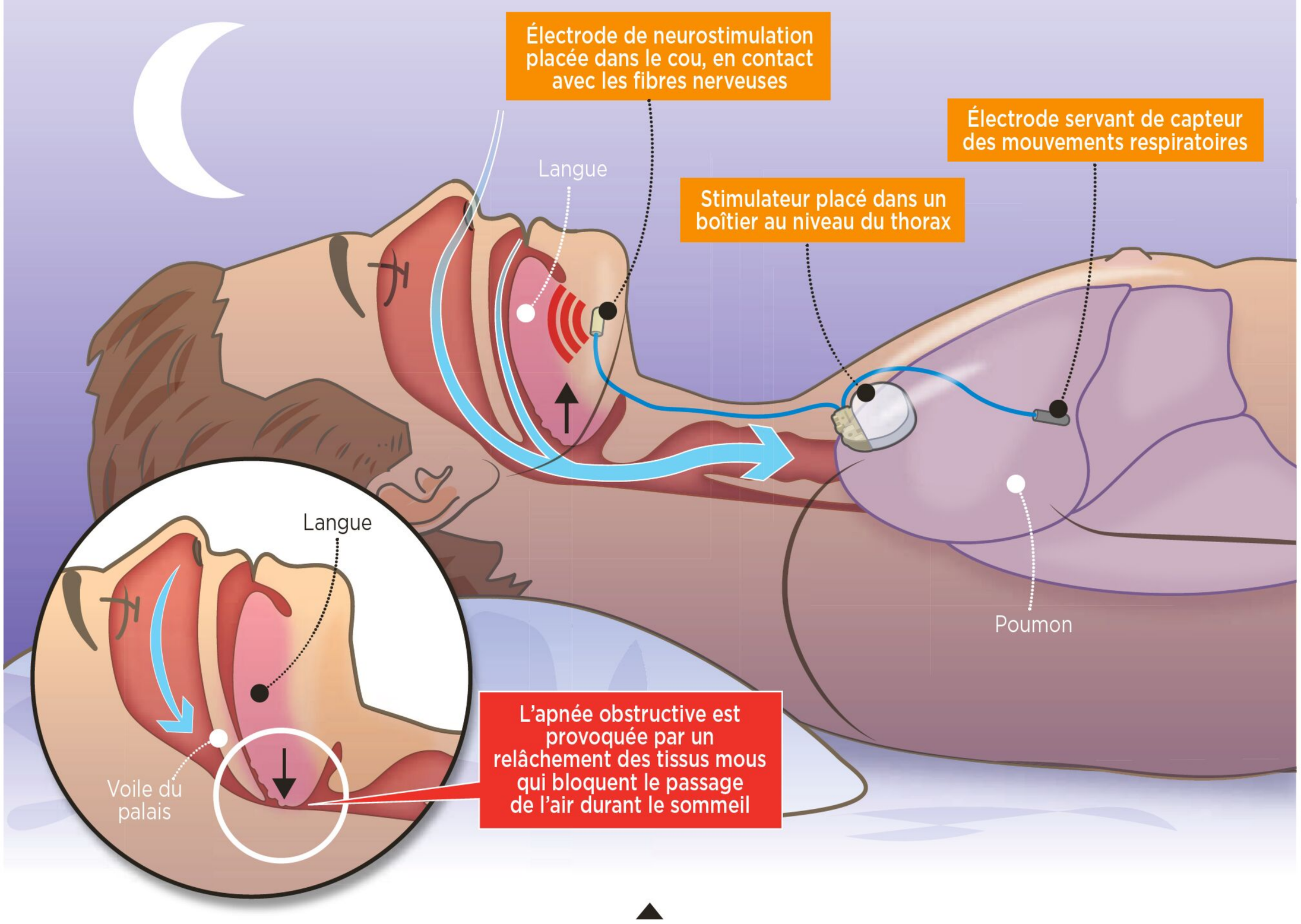
1 milliard
Le nombre d'apnéiques dans le monde.

1 personne sur 2
ignore qu'elle est atteinte d'apnée obstructive du sommeil.

30 %
au moins des plus de 65 ans sont concernés par cette pathologie. Deux fois plus d'hommes que de femmes.

Entre 4 et 20 %
de la population concernée en France.

SOURCES: SNDS, INSERM.

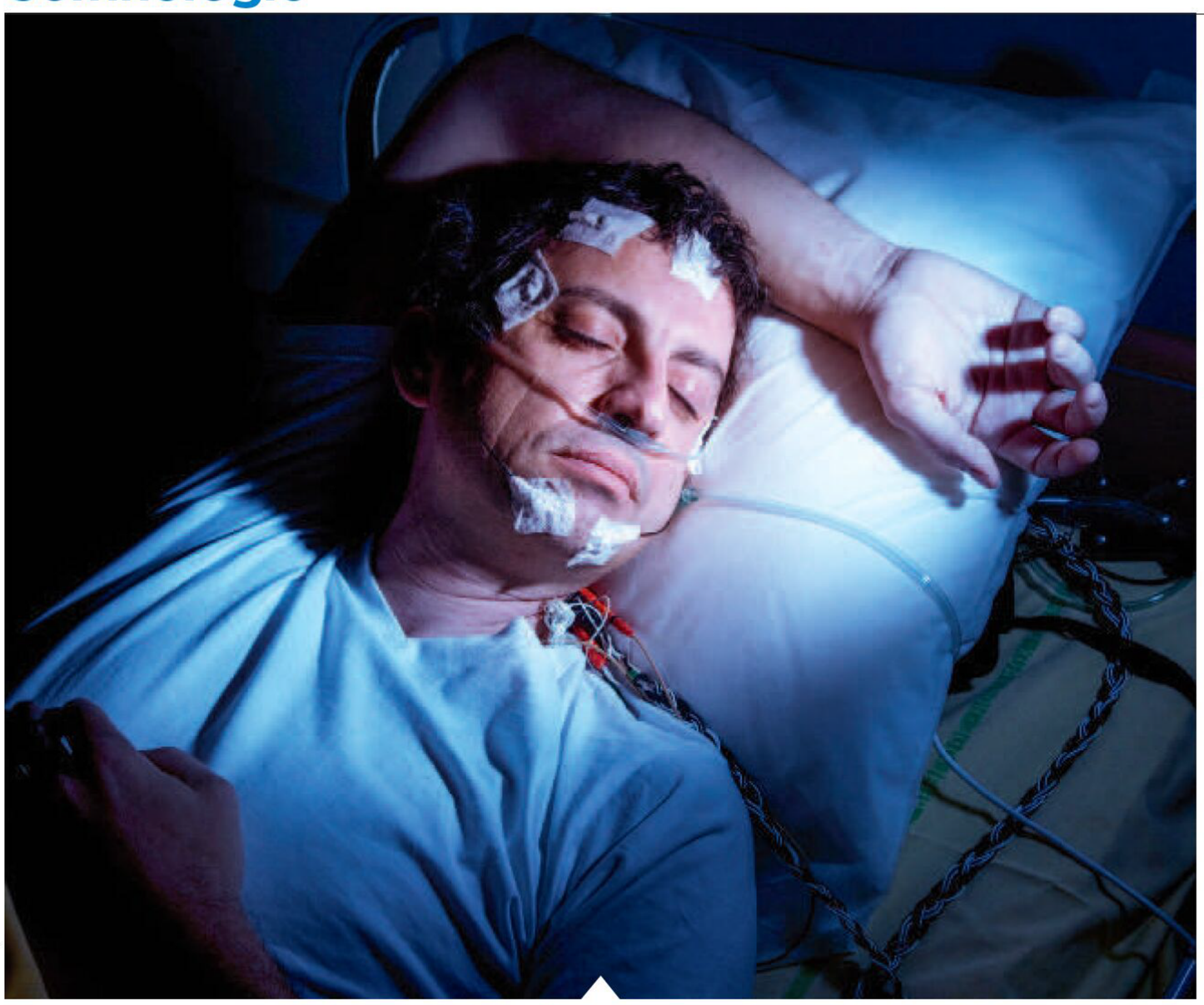


BRUNO BOURGEOIS

À chaque inspiration détectée par l'électrode respiratoire, un signal est envoyé à l'électrode de neurostimulation afin d'activer le muscle et tirer la langue vers l'avant, libérant ainsi le passage de l'air.

Bas, Suisse), environ 130 personnes en France. Les projections prévoyant 250 à 400 implantations par an pour l'année à venir dans l'Hexagone. Pour Mme Y. (Montpellier), 62 ans, c'est fait depuis un an. Après cinq ans d'errance diagnostique, de nombreux essais (et échecs) avec près de 17 modèles de masques différents (facial, nasal, narinaire…), c'est elle-même qui a pris connaissance du dispositif grâce à des recherches sur Internet et en a parlé à son médecin.

M. X. (Paris), 59 ans, lui, ne supportait plus le masque. *« Ressembler à Dark Vador toutes les nuits, je ne pouvais plus,* témoigne-t-il aujourd'hui, *alors quand mon ORL m'a proposé cet implant, j'ai tout de suite dit oui.* » L'un comme l'autre activent chaque soir leur dispositif avant de s'endormir et l'éteignent au réveil.
Avec le syndrome des apnées obstructives du sommeil, tout se joue la nuit en position allongée en raison des fermetures répétées du pharynx, le plus souvent en lien avec un relâchement des muscles des parois de la gorge et de la langue ou d'autres anomalies morphologiques de la mâchoire. Conséquence : l'air ne circule pas assez et c'est alors que surviennent les apnées, ces temps d'arrêts respiratoires responsables de microréveils dont le dormeur ou la dormeuse n'ont pas toujours conscience. Le passage en force de l'air provoque aussi souvent — mais pas toujours — des vibrations des tissus à l'origine de



VOISIN/PHANIE

L'enregistrement polysomnographique permet de mettre en évidence des anomalies respiratoires pendant le sommeil (ici à l'hôpital Lariboisière, à Paris).

ronflements plus ou moins sonores. *« Une fréquente plainte du patient ou du conjoint lors de la première consultation, avec la fatigue, la somnolence diurne et les difficultés de concentration,* témoigne le Dr Abdel Latif El Hallak, cardiologue et spécialiste du sommeil à l'Institut cœur Paris centre. *Mais les patients ne sont pas toujours symptomatiques. Certains sont adressés par leur généraliste, cardiologue, neurologue, gériatre ou ophtalmologue, en raison d'une hypertension sévère résistante aux traitements, de migraines non soulagées, de l'apparition de troubles cognitifs ou même d'un glaucome.* » Si la réalisation de questionnaires (test de Berlin, Epworth) permet d'apprécier le retentissement des apnées sur la qualité de vie, le diagnostic repose, lui, sur la mesure de l'activité respiratoire au cours du sommeil (polygraphie ventilatoire) nécessitant la pose d'une canule nasale, d'un oxymètre au bout du doigt, de capteurs thoraciques et abdominaux… ou, encore plus complet, d'un enregistrement du sommeil dit polysomnographie (avec en plus un électrocardiogramme, un électroencéphalogramme, un électromyogramme et un oculogramme). Des examens qui s'effectuent à domicile ou dans un centre spécialisé, même si différentes techniques de détection moins invasives, mais pas encore validées, visant à faciliter le dépistage sont en développement *(lire l'encadré ci-contre)*. L'analyse des différents paramètres obtenus permettra d'apprécier la gravité du syndrome par le calcul de l'index d'apnée par heure (IAH), le paramètre le plus couramment utilisé aujourd'hui. *« Imparfait, il est en train d'évoluer,* précise Frédéric Gagnadoux, *et de nouveaux biomarqueurs plus précis sont en cours d'étude. »* En attendant leur validation, aujourd'hui on compte toujours les pauses, qu'il s'agisse de réelles interruptions (apnées) ou de réductions (hypopnées), on analyse leur durée (d'au moins dix secondes, mais parfois jusqu'à plus d'une minute).

Un patient sur deux abandonne sa machine au bout de 3 ans

Car ces pauses provoquent à chaque fois un manque d'apport d'oxygène aux différents tissus de l'organisme (cœur, cerveau, vaisseaux, foie, œil…). Or, il est désormais bien établi, même si les mécanismes ne sont pas encore tous élucidés, que ces multiples hypoxies augmentent à terme le risque de survenue de troubles cardio-vasculaires comme l'hypertension, l'infarctus du myocarde, les accidents vasculaires cérébraux, les troubles du rythme cardiaque, mais également des troubles métaboliques (diabète), cognitifs, Parkinson, le glaucome… D'où l'intérêt de la prise en charge médicale si l'IAH est supérieur à 5 (en dessous, il est considéré comme physiologique). Dans les formes légères (IAH entre 5 et 15), les conseils dits positionnels (*lire l'encadré ci-contre*) associés à une perte de poids et parfois à des séances de kinésithérapie de la langue (*lire* S. et A. *n° 905*) peuvent suffire. Pour les formes modérées (IAH de 15 à 30), le port nocturne d'une gouttière dentaire (orthèse d'avancée mandibulaire) peut permettre d'avancer la mâchoire

RECOMMANDATIONS

Ne plus dormir sur le dos

Environ 20 % des patients apnéiques le sont exclusivement en position dorsale. De plus, on sait que dormir sur le côté peut réduire de moitié le nombre d'obstructions pendant la nuit. Au moins deux raisons pour oublier la position dorsale et donc dormir sur le côté. Pour y parvenir, il y a l'astuce de la balle de tennis cousue dans le dos du pyjama ou celle du sac à dos mou (sans armatures) rempli d'un coussin que l'on enfile sur le dos comme pour une randonnée avant de s'allonger. C'est le même principe que le Pasuldo, qui, lui, est payant. En revanche, pas de recommandations validées en faveur des dispositifs vibrants de réveil et autres oreillers autoproclamés anti-ronflement. Derniers conseils : le soir, éviter l'alcool (myorelaxant) ainsi que les repas copieux, et envisager de perdre du poids.

MORE MAGAZINES: XSAVA.XYZ

DÉTECTION

L'essor des dispositifs portables connectés

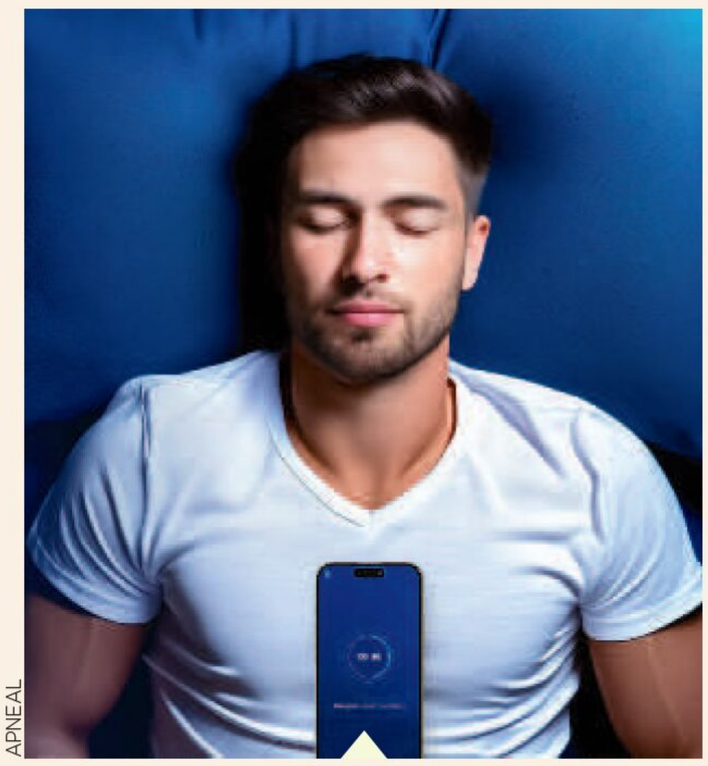
Montres connectées, patchs ou capteurs à glisser dans la literie… Depuis 2020 fleurissent sur le marché une multitude de dispositifs portables connectés promettant au tout-venant de détecter et suivre son apnée du sommeil. Des appareils qui viennent combler un besoin de suivi médical à domicile dans une pathologie sous-diagnostiquée qui concernerait plus de 3 millions de Français. Problème : les listes d'attente sont longues pour passer la polysomnographie, l'examen de référence, dont la complexité de l'appareillage impose de le réaliser à l'hôpital. *« Le patient a des électrodes sur la tête, à côté des paupières, au niveau des jambes, des capteurs devant la bouche, sous le nez, sur le doigt pour mesurer le taux d'oxygène, autour du thorax »*, énumère la Dr Justine Frija, pneumologue à l'hôpital Bichat, à Paris. Les médecins disposent certes de quelques options portables — et remboursées — pour réaliser les premiers examens à domicile, comme la polygraphie ventilatoire, qui comporte moins de capteurs, ou la tonométrie artérielle de pouls, qui ressemble à un gros manchon relié à un boîtier fixé au bout du doigt, mais elles ne sont pas toujours adaptées aux situations particulières des patients, et tous les professionnels n'en sont pas équipés. Dans ce contexte, les dispositifs connectés redoublent d'efforts pour démontrer leur fiabilité au regard de l'incontournable polysomnographie. S'ils ont tous obtenu leur marquage CE, celui-ci ne garantit pas qu'ils ont été évalués avec des études solides. Certains, comme le Withings Sleep Analyzer (qui se glisse sous le matelas) ou le Sunrise (qui se colle sur le menton), ont démontré de bonnes performances par rapport à la polysomnographie. *« Ils doivent montrer au moins 80 % de concordance. Si vous voulez suivre vos apnées avec eux, pourquoi pas, mais la pertinence dans le parcours du patient est faible actuellement »*, conclut Justine Frija. Et tous ces appareils connectés restent aux frais du patient. Aussi la pneumologue coordonne l'essai du dispositif Apneal, le premier à ne reposer que sur les capteurs déjà présents dans les smartphones, moyennant le chargement de l'application. Il suffit de fixer son smartphone sur la poitrine avant de dormir, la corrélation avec la polysomnographie dépassant les 90 %. *« L'objectif n'est pas de remplacer la polysomnographie, mais d'avoir un outil complémentaire, pour trier rapidement les patients et laisser la place à ceux qui ont vraiment une apnée du sommeil »*, précise Justine Frija. ■ **C. G.**

WITHINGS SLEEP ANALYZER

Withings Sleep Analyzer. Un capteur disposé sous le matelas envoie les données sur l'application.

SUNRISE

Sunrise. Placé sur le menton, le capteur de 3 g analyse la qualité du sommeil afin d'établir un diagnostic.



APNEAL

Apneal. Cette application utilise des capteurs du smartphone fixé sur la poitrine (accéléromètre, gyroscope).

vers l'avant. Mais si l'IAH est supérieur à 30, le traitement de référence est la PPC. Certaines personnes finissent par adopter leur machine, d'autres, comme M. Y., pas du tout. *« Une étude publiée en 2024 a montré qu'au bout de trois ans, un patient sur deux abandonne la PPC »*, précise le Dr Éric Feredj, chirurgien ORL à Paris. C'est donc ici, en troisième ligne de traitement, que se positionne l'implant de neurostimulation, pour des patients dont l'IAH est compris entre 15 et 50, en échec après six mois de PPC ou d'orthèse, et non obèses (avec un indice de masse corporelle (IMC) inférieur à 32).

RESMED/DR

« Il s'agit d'une nouvelle option thérapeutique réservée aux patients en échec des autres traitements »

Frédéric Gagnadoux, chef du service de pneumologie au CHU d'Angers

Une sélection stricte des patients éligibles

« Lors de la consultation d'éligibilité, on sélectionne bien les patients, les insomniaques n'étant par exemple pas de bons candidats », précise Abdel Latif El Hallak. Les personnes retenues voient ensuite un ORL qui confirme ou pas l'implantation, *« toujours après la réalisation d'une endoscopie de l'arrière-gorge effectuée pendant le sommeil et à l'hôpital, un examen important pour s'assurer que l'affaissement des tissus s'effectue bien de l'avant vers l'arrière »*, détaille le chirurgien. Si l'intervention est décidée, un protocole ultraprécis de rendez-vous et d'examens se met en place. Le jour J, le chirurgien réalise sous anesthésie générale deux petites incisions : l'une sur le thorax pour glisser sous la peau le stimulateur relié à une première électrode dite respiratoire, l'autre dans le cou, afin d'accéder aux fibres nerveuses et les relier à une seconde électrode dite de stimulation elle-même reliée au boîtier (*voir l'infographie p. 69*). *« Une fois le dispositif activé, à chaque début d'inspiration détectée par l'électrode respiratoire positionnée tout près du stimulateur, un signal sera envoyé à la seconde électrode pour stimuler le muscle et tirer la langue vers l'avant »*, détaille Éric Feredj.

Après une nuit d'hospitalisation, le patient rentre chez lui et devra attendre un mois, le temps de la cicatrisation. *« Le dispositif sera alors activé en consultation pour déterminer l'intensité des premiers seuils de sensibilité et de stimulation »*, précise Abdel Latif El Hallak.

Le dispositif est à remplacer tous les dix ans

Le soir venu, le patient pourra alors, pour la première fois, utiliser sa télécommande. *« Ce n'est pas on/off,* précise l'ORL, *le dispositif se déclenche trente minutes environ après pour permettre au patient de s'endormir. » « Au début, la sensation de petits picotements indolores est un peu étrange,* se souvient M. Y., *mais elle s'atténue avec les réglages progressifs sur environ un mois.* » La diminution objective du nombre d'apnées est évaluée trois mois plus tard avec un nouvel enregistrement du sommeil. Fin novembre 2025, Inspire Medical Systems a lancé l'étude européenne Eurostim afin de suivre au plus près la cohorte des patients implantés. Coordonnée par Frédéric Gagnadoux, elle doit durer dix ans, le temps de fonctionnement prévu de la batterie au bout duquel le dispositif devra être changé. ■

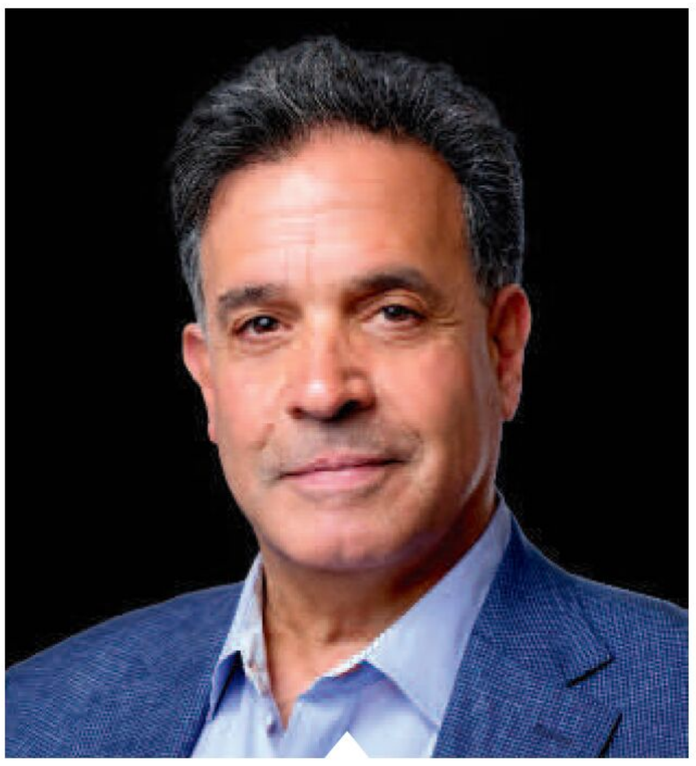
RECHERCHE

Des molécules à l'essai

Agir non plus par voie mécanique mais grâce à la chimie. Telle est l'approche suivie par plusieurs équipes. C'est le cas de la start-up américaine Apnimed, qui a développé l'AD109, un médicament combinant deux molécules déjà présentes sur le marché. La première renforce le tonus musculaire du pharynx, la seconde prévient son relâchement excessif pendant le sommeil. Les premiers résultats des essais cliniques en cours sont prometteurs et une demande d'approbation auprès de l'agence américaine du médicament (FDA) est prévue. Une équipe australienne s'intéresse, elle, à un autre mécanisme d'action reposant sur un inhibiteur des canaux potassiques, testé dans un spray nasal administré au moment du coucher. Selon les premiers résultats, une pulvérisation permettrait d'augmenter l'activité des muscles qui maintiennent les voies respiratoires supérieures ouvertes. À cet arsenal thérapeutique du futur, il faudra bien sûr ajouter les fameux médicaments de l'obésité, les GLP-1 (*lire* S. et A. *n° 931*), sans oublier la gamme des stimulants de l'éveil (pitolisant, solriamfétol, modafinil) qui, eux, réduisent efficacement la somnolence résiduelle. Reste à trouver les doses du cocktail parfait.

RUDOLPH TANZI
NEUROLOGUE

La maladie d'Alzheimer existait déjà à la préhistoire


HARVARD MEDICAL SCHOOL

Professeur de neurologie à l'université Harvard, Rudolph Tanzi est directeur de l'unité de génétique au Massachusetts General Hospital, à Boston (États-Unis).

Les protéines bêta-amyloïdes et la protéine tau, impliquées dans cette maladie neurodégénérative, auraient servi à cette époque à défendre le cerveau de l'infection de pathogènes.

Dans une récente étude que vous avez publiée dans* Nature Neuroscience, *vous concluez que la maladie d'Alzheimer existait déjà durant la préhistoire. Mais à l'époque, elle aurait eu un effet protecteur ?
On sait aujourd'hui que la maladie d'Alzheimer se caractérise entre autres par l'accumulation de protéines bêta-amyloïdes en plaques dans le cerveau. Et que certaines personnes sont porteuses de gènes qui favorisent l'apparition de la maladie. Aussi, nous nous sommes demandé si la protéine bêta-amyloïde pouvait être plus qu'un simple détritus dans le cerveau. Car les peptides antibactériens sont la première ligne de défense contre un pathogène : c'est un mécanisme très ancien, qui intervient avant même que les anticorps ne se mettent en ordre de marche. Quand ils rencontrent un pathogène, ils s'agrègent autour pour le capturer et l'empêcher d'infecter l'organisme. Nous nous sommes dit : peut-être que les protéines bêta-amyloïdes ont cette fonction pour protéger le cerveau ?

Comment avez-vous procédé ?
Nous avons commencé par montrer que chez les souris atteintes de salmonellose, celles capables de produire des protéines bêta-amyloïdes survivent mieux que les autres. De même avec le virus de l'herpès. Puis, pour observer ce qui se passe en vingt ou vingt-cinq ans dans le cerveau humain, nous avons créé des modèles d'organoïdes. Ils nous permettent d'observer le phénomène en six semaines seulement. Nous avons observé que, lorsqu'ils sont mis en contact avec de virus de l'herpès, les organoïdes produisent de la plaque bêta-amyloïde dès le lendemain. Il se passe la même chose avec des champignons, des levures ou des bactéries. *Idem* pour la protéine tau, qui se met à fibriller autour du virus.

Ce mécanisme de défense aurait pu profiter aux hominidés de la préhistoire ?
Oui. À l'époque, les personnes capables de produire davantage de plaques amyloïdes ou de protéines tau, ou encore d'induire de l'inflammation plus rapidement dans le cerveau — autres caractéristiques de la maladie d'Alzheimer —, avaient un avantage certain lors de pandémies mettant en jeu une infection du cerveau. Quand l'espérance de vie était d'environ vingt-cinq ou trente ans, les hominidés ne vivaient pas assez longtemps pour que la maladie d'Alzheimer se développe. Ces mutations étaient donc protectrices. Comme la pression sélective tend à perpétuer les traits avantageux, elles ont perduré jusqu'à notre ère.

« Les hominidés ne vivaient pas assez longtemps pour que la maladie d'Alzheimer se développe »

Comment valider cette hypothèse ?
Nous recueillons des échantillons de cerveaux Alzheimer *post mortem* et partons à la recherche d'ADN et d'ARN microbiens. C'est de l'archéologie moléculaire, en quelque sorte. Pour avoir un groupe de contrôle, nous prélevons aussi une partie de cerveaux sains. Pour l'instant, ce qu'on voit le plus, ce sont des bactéries parodontales provenant de la gencive ainsi que des bactéries respiratoires. Le problème, c'est qu'il faut pouvoir être certain que ce ne sont pas des maladies qui ont été contractées en fin de vie. ■

Propos recueillis par Coralie Lemke

La face cachée des arômes alimentaires

Les arômes naturels ou artificiels rehaussent les saveurs de tous les produits alimentaires industriels. Or leur étiquetage sur les emballages peut induire en erreur. Voici les clés pour s'y retrouver.

Yaourts, chips, biscuits, sauces… Les arômes se cachent dans la quasi-totalité des produits industriels pour donner, ici un goût vanille à une crème dessert ou un arôme de truffe à une huile, là une saveur artificielle comme celle de barbecue, à des chips ou à une sauce mayonnaise… Toutefois, leur étiquetage sur les emballages peut parfois induire en erreur le consommateur, le diable se situant toujours dans les détails.

2500
substances aromatisantes naturelles et artificielles sont autorisées dans l'Union européenne.
(SOURCES: RÈGLEMENTS CEE 1334/2008 ET UE 872/2012.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Pas toujours si « naturels »…

Les arômes naturels sont constitués d'un mélange complexe de composés aromatiques tels que les aldéhydes, les alcools, les cétones, etc. Ainsi, l'acétate isoamyle, un ester, confère son arôme fruité à la banane (1). Les substances aromatiques sont extraites par des solvants alimentaires (alcool) par distillation à la vapeur ou encore, par fermentation, notamment pour les arômes de fromage.

Selon la réglementation européenne (2), « l'**arôme naturel** de » fraise, par exemple, doit être produit à partir d'au moins 95 % du fruit rouge. Mais attention aux mentions affichées car « l'arôme naturel » fraise peut, lui, être issu de la fermentation et de la transformation de copeaux de bois (toujours une source naturelle)

ARÔME NATUREL Substance aromatisante issue de matières premières naturelles d'origine végétale (fruits, épices, etc.), ou animale (bœuf, crevettes, produits laitiers, produits de la ruche).

ARÔME ARTIFICIEL Substance aromatisante obtenue par synthèse chimique. Ils portent les mentions « arôme », « arôme artificiel », certains noms chimiques comme « éthylvanilline » ou encore « goût coco », « saveur caramel ».

VANILLINE Aldéhyde aromatique naturel présent dans les gousses de vanille en très faible quantité (2 à 3 g/100 g de gousses sèches), d'où l'utilisation massive dans les produits de vanilline de synthèse, moins chère.

mais sans aucune trace de fraise ! Les esters du fruit peuvent en effet se former à partir d'acides aromatiques naturels du bois.

… le plus souvent artificiels

Les arômes de synthèse sont fabriqués en totalité en laboratoire pour recréer un goût connu ou une saveur qui n'existe pas dans la nature, comme l'arôme « barbe à papa ». Certains possèdent une structure proche de celle de l'arôme naturel, comme l'éthylvanilline, qui diffère de la **vanilline** par la substitution d'un groupement méthyle ($-CH_3$) sur la liaison éther par un groupement éthyle ($-CH_2-CH_3$). À ne pas confondre, toutefois, avec la vanilline de synthèse, généralement obtenue par oxydation chimique à partir de gaïacol (3). En revanche, d'autres arômes de synthèse possèdent des structures totalement différentes des molécules aromatiques naturelles. C'est le cas du méthylphénylglycidate d'éthyle qui reproduit l'arôme de la fraise.

Bien lire les étiquettes

Les arômes de synthèse se cachent derrière diverses mentions floues comme « arôme », « goût » coco ou encore « saveur » crabe. Prudence aussi si plusieurs mentions sont affichées sur la liste des ingrédients, par exemple, « arômes » et « extrait de vanille ». Si l'extrait est effectivement obtenu uniquement à partir de gousses de vanille, la conjugaison de ces deux termes peut indiquer qu'il n'est ajouté qu'en infime quantité, si aucun pourcentage n'est précisé. En revanche, pour les produits bio, seuls les arômes dits « naturels de », les extraits et les huiles essentielles naturels sont autorisés.

Les arômes de fumée désormais interdits

Depuis juillet 2024, huit arômes de fumée sont interdits en Europe et seront retirés progressivement des denrées alimentaires. Utilisés dans les chips et les sauces pour en renforcer la saveur, ou dans les jambons, poissons et fromages pour remplacer le fumage traditionnel, ces **arômes artificiels** de fumée, fabriqués par liquéfaction de fumée de bois, ont été estimés par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa) (4) comme des substances présentant des risques de génotoxicité *« confirmés »* ou ne *« pouvant être exclus »*. Sur la liste des ingrédients, ces substances sont indiquées comme *« arôme de fumée »* ou *« fumée liquide »*.

Ils peuvent tromper le cerveau

Des chercheurs dijonnais ont fait goûter à des individus obèses ou pas des boissons sucrées (jus de pomme, cacao, etc.) et aussi salées dont les goûts ont été dans les deux cas renforcés par l'ajout d'arômes, soit de vanille, fraise ou lychee, soit de bacon et d'ail fumé. Résultat : 83 % des participants obèses (contre 61 % des non-obèses) ont perçu le jus de pomme contenant une odeur de vanille comme étant plus sucré que le même jus sans odeur ajoutée. Plus étonnant, 37 % d'entre eux ont perçu le jus de pomme avec l'odeur de vanille plus sucré que le jus de pomme auquel on avait ajouté 33 % de sucre (5). ■

Sylvie Boistard

ANTHONY FARDET Chargé de recherche en alimentation préventive, durable et holistique, Inrae de Clermont-Ferrand/Theix*

Les arômes augmentent l'appétence pour les produits ultratransformés

« Naturels ou artificiels, les arômes sont des marqueurs d'ultratransformation. Ils exacerbent les saveurs, ce qui augmente l'appétence pour les produits industriels. Or, une récente étude menée sur une cohorte (UK Biobank) montre une association entre les arômes et une augmentation de 20 % de la mortalité, toute cause confondue (6). En outre, standardiser les goûts peut ainsi poser des problèmes d'éducation chez les plus jeunes, qui finissent par trouver plus fades les « vrais » aliments et s'en détournent. »

* Auteur de « Pourquoi tout compliquer ? Bien manger est si simple », Thierry Souccar Éditions, 2021.

(1) Comparative study of volatile compounds in the fruit of two banana cultivars at different ripening stages, Zhu X. et al, *Molecules*, 2018.

(2) CE n° 1334/2008.

(3) Strategies for improving the production of bio-based vanillin, Liu Y. et al, *Microbial Cell Factories*, 2023.

(4) Arômes de fumée : questions et réponses avec Wim Mennes, président du groupe de travail de l'Efsa sur les substances aromatisantes, efsa.europa.eu, novembre 2023.

(5) Influence of obesity on saltiness and sweetness intensity enhancement by odors, Aveline C. et al, *Food Quality and Preference*, 2022.

(6) Association of 37 markers of ultra-processing with all-cause mortality: a prospective cohort study in the UK Biobank, Krost K. M. et al., *eClinicalMedicine*, 2025.

Bio-inspiration

La paléontologie, source d'innovation technique

De la carapace du glyptodon aux ailes des ptérosaures, l'analyse poussée de fossiles fournit un nouveau champ d'étude pour l'ingénierie, la robotique ou l'architecture. Des solutions mécaniques qui ont fonctionné pendant des millions d'années pourraient être adaptées aux défis technologiques du monde actuel.

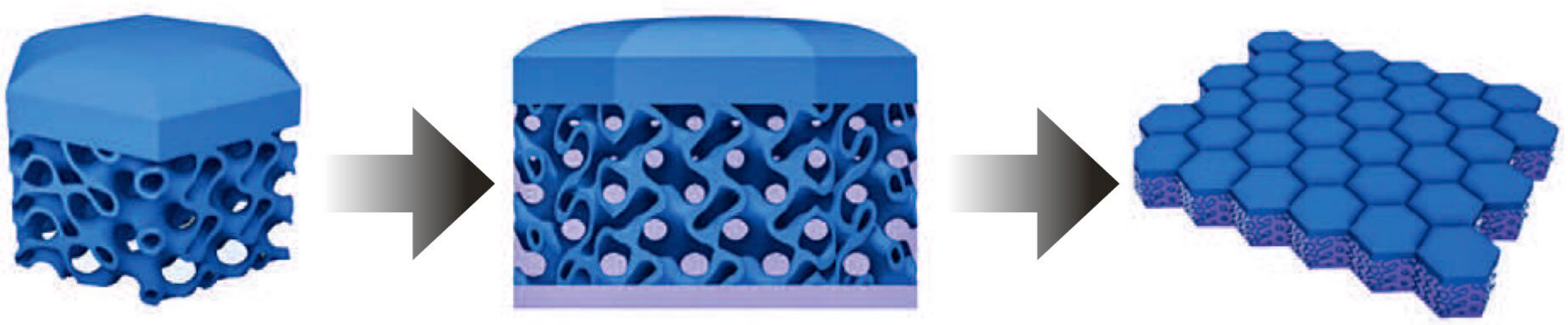
Par Joël Ignasse

SPL/AKG

Une hécatombe. Depuis l'apparition du vivant, la Terre a traversé cinq grandes crises qui ont emporté entre 70 et 90 % des espèces à chaque épisode. Ces catastrophes ont remodelé la biosphère, éradiqué des formes de vie plus jamais revues et rebattu les cartes de l'évolution. Un chiffre résume cette cruelle trajectoire : l'ensemble des espèces actuelles ne représente que 0,1 % des formes de vie ayant existé ! Autrement dit, l'immense majorité des solutions biologiques inventées par l'évolution a disparu. Ce gigantesque catalogue d'expériences naturelles, dont certaines pourraient encore éclairer nos propres défis, commence aujourd'hui à être étudié dans une approche de bio-inspiration.

Depuis plusieurs décennies déjà, la bio-inspiration s'appuie sur l'observation du vivant pour concevoir des matériaux, des structures ou des solutions techniques. C'est sur cette idée que repose la paléobio-inspiration. *« Le registre fossile élargit notre champ d'observation. Il nous permet d'étudier des solutions mécaniques qui n'existent plus mais qui ont fonctionné pendant des millions d'années. Certaines sont même plus efficaces que ce que l'on conçoit aujourd'hui »*, souligne Alexandra Houssaye, paléontologue spécialisée en morphologie fonctionnelle et directrice de recherche CNRS au Muséum national d'histoire naturelle à Paris, institution qui a organisé le premier symposium international sur la paléobio-inspiration en 2023, et qui poursuit cet élan à travers le programme Bioinspire.

Il en va ainsi, par exemple, du glyptodon. Cet herbivore sud-américain, disparu il y a un peu plus de 10 000 ans, pouvait dépasser la tonne et portait une carapace faite de milliers d'ostéodermes soudés entre eux, formant une coque rigide, épaisse et remarquablement structurée. Des chercheurs ont analysé la

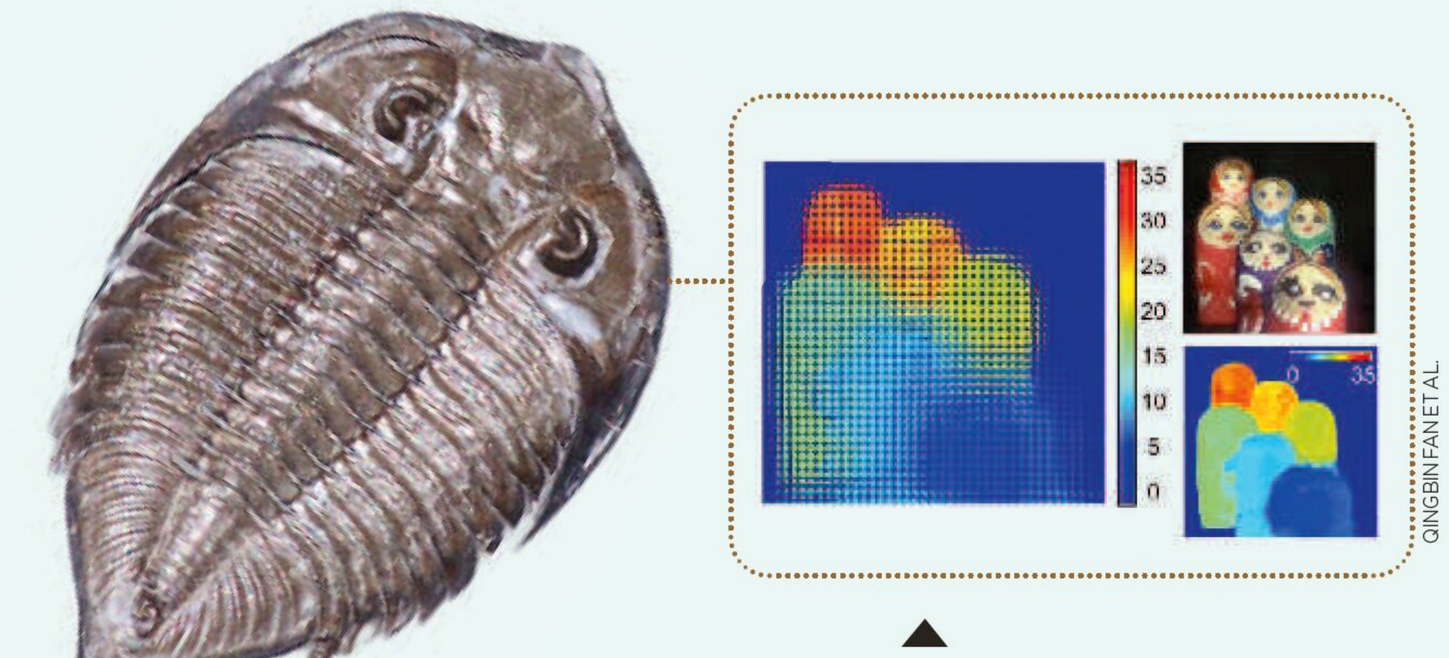


FULONG ZHANG ET AL.

Le glyptodon (vue d'artiste), un genre disparu de tatou géant, portait une carapace faite de plaques osseuses imbriquées. Ci-dessus, un blindage composite reprend cette logique en « tuiles ». Constitué d'une céramique injectée d'aluminium, il est optimisé par simulation pour absorber l'énergie cinétique des projectiles et dissiper les impacts.

OPTIQUE

Trilobites : des yeux fossiles inspirent la caméra du futur



QINGBIN FAN ET AL.

« Dalmanites limulurus », un trilobite fossile vieux de plus de 400 millions d'années. Ses yeux composés ont inspiré la conception d'une caméra pouvant estimer la profondeur de champ et refocaliser l'image à différentes distances.

Les trilobites, des arthropodes qui vivaient au paléozoïque, avaient déjà résolu un problème optique complexe : voir net à plusieurs distances en même temps. Chez certaines espèces, comme *Dalmanitina socialis*, les yeux composés associaient deux systèmes de lentilles distincts, capables de focaliser simultanément des objets proches et lointains. Une architecture fondée sur des lentilles de calcite, rigides et précisément orientées, qui offrait une profondeur de champ importante sans mécanisme d'accommodation. En s'inspirant directement de cette organisation bifocale, des chercheurs de l'université de Nanjing, en Chine, ont conçu une caméra nanophotonique capable de couvrir une plage de distances extrêmement large sans sacrifier la résolution. Les images obtenues sont ensuite traitées avec des réseaux de neurones pour corriger les aberrations optiques. L'équipe revendique ainsi une profondeur de champ allant de quelques centimètres à plus d'un kilomètre.

géométrie de ses ostéodermes puis ont reconstitué, grâce à l'impression 3D, sa carapace pour la tester. Résultat : cet animal possédait une protection qui offrait un compromis optimal entre résistance et absorption d'énergie. De quoi inspirer de futures protections balistiques ? Il faudra sans doute plusieurs années d'optimisation avant de voir un gilet pare-balles dérivé du glyptodon, un casque inspiré du pachycéphalosaure (un dinosaure qui possédait un dôme osseux de 25 cm d'épaisseur au sommet de son crâne), des drones volants animés par des ailes imitant celles des ptérosaures *(lire l'encadré p. 82)* ou encore des robots sous-marins équipés de palettes natatoires similaires à celles des reptiles marins qui vivaient il y a plus de 65 millions d'années. En effet, les solutions forgées par l'évolution ne sont jamais des réponses parfaites à un problème unique. Elles sont presque toujours le produit d'un compromis. Une structure osseuse, une carapace, une coquille ou une fleur ne sont pas optimisées pour une seule fonction, mais pour faire face à plusieurs contraintes simultanées, parfois contradictoires.

Comme le résume Alexandra Houssaye, *« la première étape, c'est toujours de vérifier si la relation forme-fonction est aussi bonne qu'on le suppose. Est-ce que c'est vraiment cette structure-là qui est intéressante ? Quelle partie exactement ? Et pourquoi, comment ? Un organisme est optimisé pour une pléthore de choses en même temps, alors qu'en ingénierie, on cherche souvent une fonction précise. Il faut donc découper ces relations, choisir et extraire celle que l'on veut vraiment exploiter. »*

Pénétrer virtuellement dans l'os et obtenir l'architecture interne

L'exploration du passé à la recherche de solutions pour l'avenir serait restée largement théorique il y a encore vingt ans. Elle est devenue opérationnelle grâce à une série d'outils qui ont profondément transformé l'étude des fossiles. La microtomographie aux rayons X permet aujourd'hui de pénétrer virtuellement l'intérieur d'un os ou d'une coquille sans y toucher. Les chercheurs n'observent plus seulement des formes externes, mais des architectures internes, des réseaux de travées, des gradients de densité. À ces images s'ajoutent des modèles numériques par éléments finis, capables de simuler contraintes, flexions et zones de rupture potentielles.

DANIELCD-CC3.0

Néanmoins, des travaux préliminaires montrent des résultats soulignant le fort potentiel de la paléobio-inspiration. *« C'est encourageant parce que cela montre qu'on n'a pas besoin de reproduire toute la complexité biolo-*

gique pour capter les règles mécaniques essentielles », souligne Alexandra Houssaye. La scientifique travaille notamment sur l'architecture interne des os porteurs chez les grands mammifères actuels et fossiles, ainsi que chez les dinosaures, en particulier les sauropodes. Ces animaux ont supporté des masses considérables (plus de 100 tonnes pour les plus gros dinosaures) grâce à une distribution optimisée de la matière, concentrée là où les contraintes mécaniques étaient les plus fortes. En génie civil, ces principes nourrissent aujourd'hui des réflexions sur des bétons allégés, économes en matériau et en énergie, avec à la clé une réduction directe de l'empreinte carbone des structures.

Les nouvelles technologies ouvrent le champ bien au-delà du squelette des vertébrés. Les ammonites, ces mollusques qui ont occupé les océans pendant près de 335 millions d'années, sont devenues des objets d'expérimentation physique. En reconstruisant leurs coquilles, en les testant sous forme de robots nageurs, les chercheurs explorent les compromis entre stabilité, traînée et maniabilité. Comme le fait remarquer David Peterman, spécialiste de la biomécanique des céphalopodes fossiles, *« ces animaux sont en quelque sorte des sous-marins à propulsion par jet, avec une coque rigide et très peu de surface de contrôle* ». Ses travaux montrent que *« les coquilles aplaties glissent mieux, sont plus stables mais tournent difficilement, alors que les formes plus sphériques sont très maniables mais peinent à maintenir leur trajectoire* ». Pour lui, l'intérêt dépasse largement la paléontologie : *« Beaucoup de ces contraintes physiques sont exactement celles que rencontrent les ingénieurs lorsqu'ils conçoivent des robots sous-marins. »*

Les plantes fossiles offrent également un autre terrain d'exploration. Les architectures végétales des lycophytes géantes du carbonifère, les premières plantes ou les fougères arborescentes primitives ont résolu, chacune à leur manière, des problèmes fondamentaux de stabilité et de solidité de la tige et de transport de l'eau. Thomas Speck, spécialiste de biomécanique végétale et directeur du jardin botanique de Fribourg, en Allemagne, y voit un réservoir d'idées encore largement sous-exploité : *« Les plantes fossiles montrent des solutions très différentes pour combiner stabilité mécanique et conduction de l'eau avec les mêmes cellules.* » En étudiant celles qui ont résisté aux crises biologiques, on apprend aussi que *« la surspécialisation à un environnement donné est extrêmement dangereuse lorsque celui-ci change* ». En revanche, l'optimisation des ressources, c'est-à-dire le développement d'une solution suffisante impli- ▶

MIAMI UNIVERSITY

« Les céphalopodes fossiles sont en quelque sorte des sous-marins à propulsion par jet, avec une coque rigide et peu de surface de contrôle »

David Peterman, professeur assistant à l'université de Miami (États-Unis), spécialiste de la biomécanique des céphalopodes fossiles

FLORENT PEY / AKG IMAGES

◀ **Le diplodocus** (vue d'artiste) supportait un poids de 15 tonnes. La microarchitecture de ses os, plus creuse que celle de colonnes de béton, pourrait inspirer une construction moins gourmande en ressources. ▼

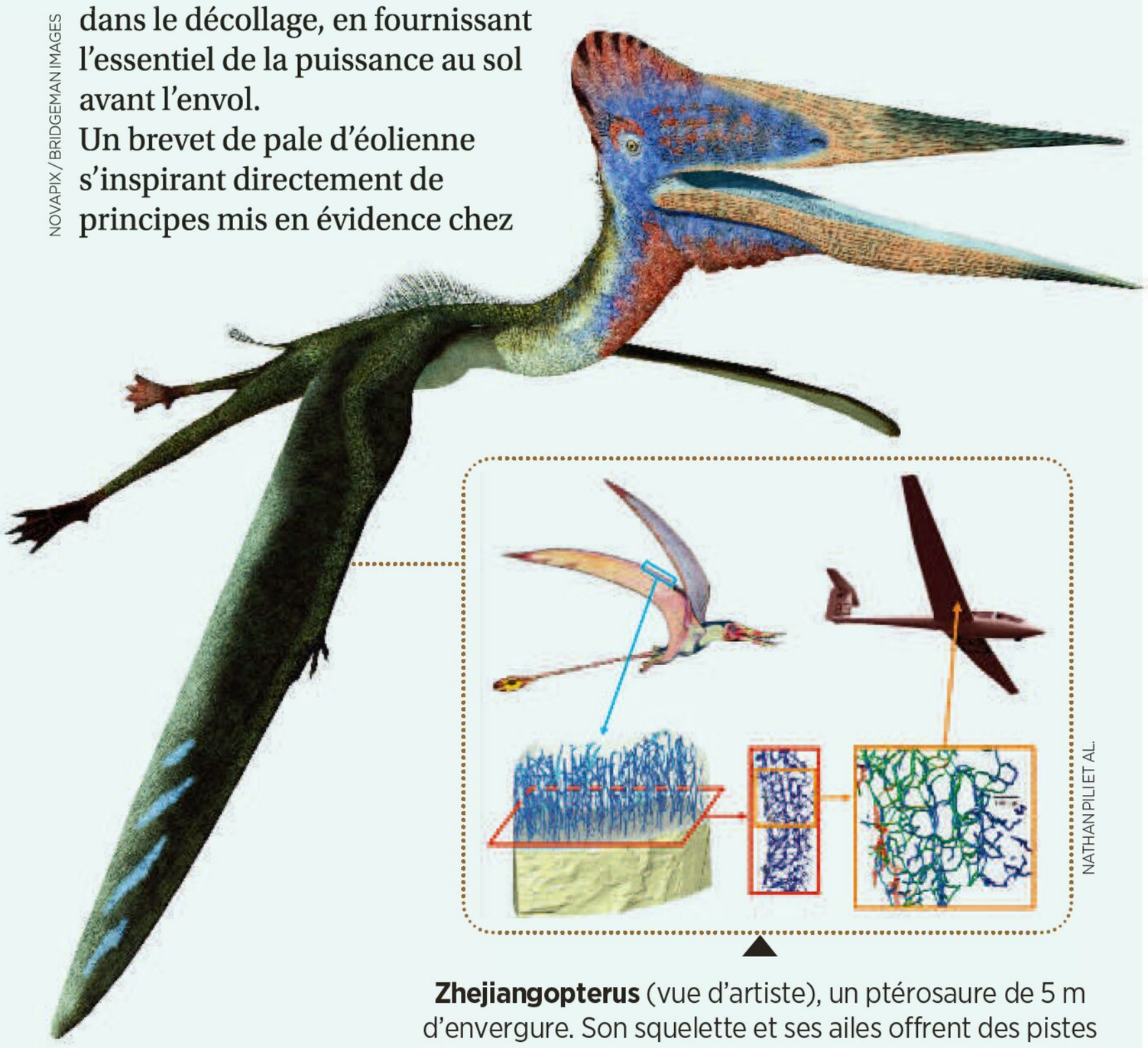
MNHN - A. HOUSSAYE

AÉROMÉCANIQUE

De multiples façons de voler chez les ptérosaures

Les ptérosaures n'ont pas seulement été les premiers vertébrés à voler. Ils ont aussi exploré une gamme de solutions aéromécaniques que l'on ne retrouve chez aucun animal actuel. Leurs ailes consistaient en une membrane souple tendue sur un unique long doigt, renforcée par des fibres internes. Cette architecture conférait aux ailes une grande capacité de déformation, tout en permettant un repli complet pour la marche au sol. Chez les ptérosaures géants, ces membres antérieurs jouaient probablement un rôle clé dans le décollage, en fournissant l'essentiel de la puissance au sol avant l'envol.

Un brevet de pale d'éolienne s'inspirant directement de principes mis en évidence chez les ptérosaures revendique ainsi une amélioration de rendement de l'ordre de 14 %. D'autres travaux ont transposé la morphologie des ptérosaures à des concepts d'aéronefs solides, capables de fonctionner dans les hautes couches de l'atmosphère terrestre, ou dans des environnements plus extrêmes comme ceux de Mars ou de Vénus. La Nasa travaille aussi sur un concept de véhicule martien à ailes repliables, conçu pour se lancer depuis le sol à la manière d'un ptérosaure.



NOVAPIX / BRIDGEMAN IMAGES

NATHAN PILIET AL.

Zhejiangopterus (vue d'artiste), un ptérosaure de 5 m d'envergure. Son squelette et ses ailes offrent des pistes pour des matériaux aéronautiques plus efficients.

- quant un minimum d'investissement matériel et énergétique, représente un avantage sélectif considérable. « *Combiner ces deux approches, à savoir l'absence de surspécialisation et l'optimisation des ressources, peut contribuer à relever les défis posés par le changement climatique* », souligne le chercheur.

Extraire des principes généraux du vivant

Mais pour que ces pistes débouchent sur des solutions concrètes, encore faut-il que la paléobio-inspiration quitte les laboratoires et trouve sa place dans les chaînes de production industrielle. C'est précisément l'un des rôles du Ceebios, le Centre d'études et d'expertise en biomimétisme, à Senlis (Oise), qui se veut un point de rencontre entre biologistes, ingénieurs, designers, architectes et industriels pour accompagner les projets d'innovation. L'enjeu est de transformer une observation issue du vivant en principe réellement exploitable. « *Notre travail consiste à partir d'un problème technique, à identifier la fonction d'intérêt, puis à explorer le vivant pour en extraire des principes généraux qui seront utilisés pour concevoir de nouveaux matériaux, produits et services* », explique Luce-Marie Petit, cheffe de projet études industrielles. Avec pour mission d'« *innover de l'échelle des matériaux, du bâtiment jusqu'au site industriel, pour réduire la consommation d'énergie et l'impact carbone, et concevoir des solutions multifonctionnelles.* »

Dans cette logique, la paléobio-inspiration apparaît comme un prolongement naturel du biomimétisme classique. « *Plonger dans le passé pour inspirer l'avenir* », résume-t-elle, en rappelant que certaines espèces fossiles ont maintenu des architectures stables pendant des durées bien supérieures à celles de nos systèmes techniques actuels. Et qu'en s'inspirant de ce passé prolixe, l'humanité pourrait trouver des solutions aux problématiques engendrées par le changement climatique et les bouleversements écologiques en cours. ■

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

4,6 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

2,7 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2 millions de fans !

plus de 303 000 followers

plus de 165 000 instagrammeurs

Plus de 67 000 abonnés professionnels

plus de 23 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Un nouvel éclairage sur les rites funéraires des Romains

À proximité du site antique d'Olbia, dans le Var, une fouille a mis au jour une vaste aire funéraire romaine datée entre le Ier et le IIIe siècle de notre ère. Reportage.

« *On est en train de gérer une urgence, ça devrait vous intéresser !* », lance Lola Bonnabel, archéologue à l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap). Nous sommes à quelques centaines de mètres de la ville antique d'Olbia, aujourd'hui située dans la commune d'Hyères (Var). Cette colonie grecque est passée sous le contrôle des Romains au moment de la défaite des troupes alliées de Pompée face à Jules César à Massalia (Marseille antique), en 49 avant notre ère. Chargée d'histoire, une partie du littoral s'est vu imposer des fouilles préventives avant que ne soit mené un projet d'élargissement de la chaussée. L'urgence ? Le ciel est d'un bleu sans nuages mais la météo annonce des pluies torrentielles d'ici à quarante-huit heures.

À une cinquantaine de mètres du rivage s'étend un vaste terrain boueux dans lequel les archéologues du service de l'archéologie du département du Var et de l'Inrap ont mis au jour un vaste ensemble funéraire datant des trois premiers siècles de notre ère. Entièrement destinées à la crémation, et bien conservées, des cavités aux parois noircies témoignent des rites funéraires des Romains. Sur le site c'est le branle-bas de combat : il faut recouvrir

MARIE PARRA

Une des tombes-bûchers contenant des céramiques et un balsamaire en verre (en bas, à droite).

les tombes pour empêcher l'eau et les boues de s'y engouffrer. Les archéologues reprennent les fouilles, au pas de course, reproduisant sur papier la succession de strates des tombes exhumées et réservant chaque fragment d'os ou de céramique dans de grands récipients annotés.

« *Olbia est entourée de remparts, à l'extérieur desquels nous nous trouvons actuellement,* situe Lola Bonnabel. *C'est généralement hors des villes, et le long des voies, que les Romains enterraient leurs défunts.* » Les chercheurs ont ainsi fait la découverte du plus important site funéraire antique de la cité : plus de 200 structures, des tombes, des bûchers et des fosses individuelles ayant servi à la fois de lieu de crémation et de tombe. « *Cette zone semble exclusivement dédiée à la crémation. On reconnaît cette pratique grâce à l'aspect des parois et des os, blanchis et tordus* », observe Valérie Bel, archéologue à l'Inrap, spécialiste des pratiques funéraires romaines, en pointant du doigt les cavités noircies. Penchée sur une tombe, elle reporte sur le papier les différentes couches de dépôt, au fur et à mesure de la fouille, afin de révéler l'organisation des pratiques, c'est-à-dire où et à quelle étape du rite ont été placés les céramiques, la vaisselle, et tous les objets retrouvés dans la tombe. « *Ce qui caractérise l'époque romaine, c'est une grande diversité dans ses pratiques funéraires, et cela se vérifie ici* », analyse la chercheuse.

B.RIEGER/HEMIS.FR

Olbia, cité grecque fondée au IVe siècle avant notre ère, située près d'Hyères, domine la Méditerranée. Le site funéraire a été mis au jour à l'extérieur des remparts de la ville.

Si certaines fosses servaient uniquement à recueillir les ossements du défunt, dans des urnes par exemple, et des offrandes, d'autres étaient conçues comme des bûchers. Le corps se consumait et les os et les objets tombaient dans le caveau sous-jacent. La présence de clous disposés aux quatre coins de ces tombes-bûchers témoigne de l'installation d'une planche où reposait le corps, juste au-dessus de la cavité. Les résidus charbonneux sont tamisés pour ne rien perdre des fragments d'os, de graines, de fruits, de vaisselle volontairement brisée… *« Nous avons même retrouvé des restes de mouton »*, se souvient Valérie Bel. Au moment de la crémation, la famille du défunt partage avec lui et avec les dieux un dernier repas, le silicernium, composé d'une préparation de viande farcie propre au rite funéraire. Ses proches déposent les plats à même le bûcher, et s'attablent près du corps. *« Il n'est pas question de manger par terre, car c'est le monde des divinités infernales, tant redoutées par les Romains,* explique Frédérique Blaizot, professeure d'archéologie romaine et spécialiste des pratiques funéraires. *Il faut comprendre que pendant l'intégralité des funérailles, les vivants côtoient la mort et se sentent en danger parce qu'ils pourraient être entraînés dans le monde des enfers.* » Depuis la mort du défunt, jusqu'aux rites de commémoration, les Romains accomplissent donc une série de rituels qui consiste à les éloigner du monde des dieux Mânes, c'est-à-dire des défunts et des divinités infernales.

« Le caractère essentiel que la société romaine attribue au mort, c'est celui de souiller les vivants, écrit John Scheid, spécialiste de l'Antiquité, dans son livre *Rites et Religion à Rome. Dès le décès, la famille inaugure une série de rites qui visent à […] se préparer à une purification progressive.* » On parle de rites d'inversion. À sa mort, le défunt est placé à l'extérieur de la maison ou dans l'atrium, cour intérieure, les pieds dirigés vers la sortie. Son corps est alors enduit de parfums. Les archéologues ont exhumé des petites fioles de verre, ou balsamaires, par dizaines. *« Très souvent, elles contenaient du parfum »*, explique Lola Bonnabel.

Des conduits permettaient aux proches de verser des libations

Un autre objet plus rare attire l'attention : un tuyau, que les archéologues ont trouvé en nombre sur ce site. Un conduit à libations. Installé au-dessus des restes du défunt inhumé, il permettait aux proches de verser des liquides, vins ou parfums, lors des rites de commémoration pour qu'ils atteignent le caveau. *« Quand les os sont placés dans une urne, il arrive qu'on trouve un orifice marquant l'emplacement d'un conduit à libations dont l'autre extrémité émergeait en surface,* indique Frédérique Blaizot. *L'objectif était d'honorer le défunt pour qu'il survive dans la mémoire, l'individu n'existant qu'en tant que membre d'une communauté, de vivants ou de morts dont il importe de perpétuer le souvenir.* »

Plus étonnant encore, les archéologues ont fait la découverte exceptionnelle d'une amphore retournée et accolée à une tuile dressée, formant ainsi un double conduit à libations, sans que celui-ci ne soit relié à aucun tombeau. *« Les offrandes allaient simplement à la terre. C'est très rare!,* s'exclame Valérie Bel. *Il est possible que cette structure ait servi à honorer directement des divinités des enfers.* » ■

Marie Parra

> « Ce qui caractérise l'époque romaine, c'est une grande diversité dans ses pratiques funéraires »
>
> **Valérie Bel,** archéologue à l'Inrap, spécialiste des pratiques funéraires romaines

L'abeille, le parasite et le savant

C'est l'histoire d'une véritable révolution qui se joue au XIXe siècle autour de l'observation d'une mystérieuse larve qui prospère dans des nids d'abeilles. Il faudra trois ans aux meilleurs entomologistes pour comprendre la stratégie de survie du sitaris et de sa larve. La zoologie classique cède la place à une science du vivant en action, attentive aux cycles de vie, aux métamorphoses et aux interactions, et non plus seulement aux caractères anatomiques figés.

Par Théophile Carrau

Au milieu du XIXe siècle, les naturalistes sont intrigués par de minuscules larves très agiles, munies de trois griffes en forme de trident : les triongulins. Léon Jean-Marie Dufour, disciple du célèbre anatomiste Georges Cuvier, décrit ce genre nouveau dans les *Annales de sciences naturelles* dès 1828. En observant la larve, Dufour pensait à une espèce distincte ; rien, dans sa morphologie, ne la rattachait explicitement à un autre insecte. À cette époque, la zoologie repose encore sur une classification à partir des formes, héritée du naturaliste suédois Carl von Linné. Pour ce dernier, la nature, dans son ordonnancement, résulte avant tout de la création divine. Selon cette approche dite de la théologie naturelle, chaque être vivant est défini par ses caractères visibles. Le triongulin observé par Léon Jean-Marie Dufour est élevé ainsi *« à la dignité de genre »*.

Mais un mystère demeure. Comment ces larves se retrouvent-elles dans les nids d'une espèce d'abeille, l'anthophore (*Anthophora pilipes*), dont les loges sont hermétiquement scellées ? Comment un tel intrus arrive-t-il à s'y introduire ? Et surtout, pourquoi voit-on sortir de ces nids non pas des triongulins, mais des coléoptères, les sitaris ? De l'entrée du triongulin à la sortie du sitaris, quelque chose échappe à l'observation. La simple description anatomique et morphologique ne semble pas capable, à elle seule, de révéler un tel cycle de vie caché.

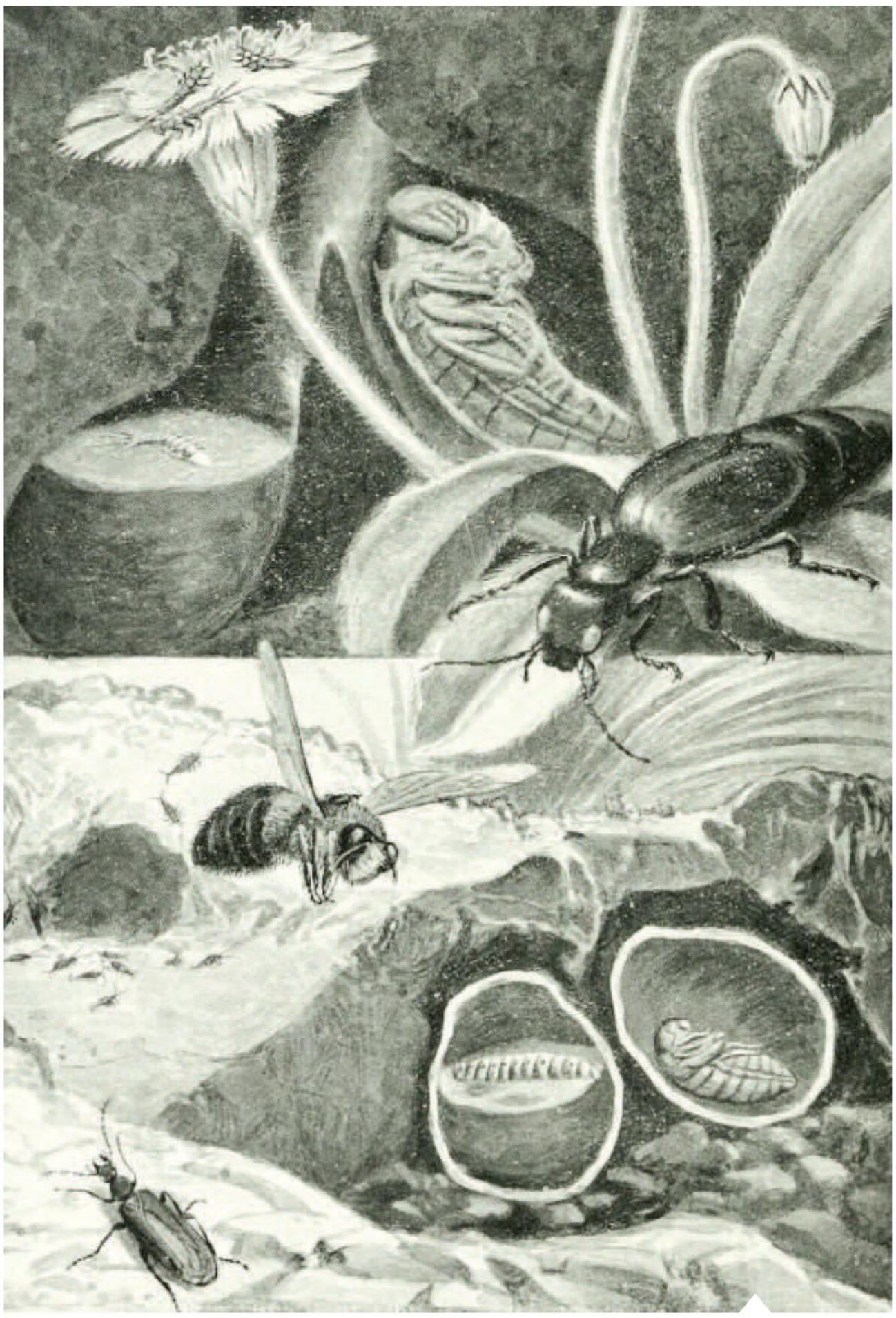
THÉOPHILE CARREAU

Philosophe des sciences, Théophile Carrau est chercheur associé à l'université Paul-Valéry Montpellier III.

Un zoologiste du Muséum national d'histoire naturelle à Paris, Henri de Lacaze-Duthiers *(lire l'encadré p. 88)*, revient sur l'histoire passionnante de cette enquête lors du congrès de l'Académie des sciences de Paris en 1889. Il explique qu'il aura fallu près de trois ans aux entomologistes, vers la fin des années 1850, pour observer minutieusement le sitaris et sa larve dans les nids de l'anthophore. Ce travail de terrain, qu'Henri Lacaze-Duthiers n'hésite pas à qualifier de véritable *« roman »*, révèle peu à peu les ruses étonnantes de ce parasite miniature.

Pour se nourrir, la larve doit attaquer sa « planche de salut »

À l'automne, la femelle sitaris, fécondée, poussée par un instinct impérieux, va pondre ses œufs au-devant des loges murées de l'anthophore. Les jeunes larves s'accumulent devant les portes closes où elles passent tout l'hiver, formant un tas mêlé aux poussières et aux débris apportés par le vent. Au printemps, les premiers anthophores



THE READING ROOM/ ALAMY/ PHOTO12

À l'instar du sitaris, les larves du coléoptère méloé utilisent une stratégie parasitaire pour pénétrer dans les loges à miel de l'abeille.

à éclore sont presque tous des mâles. C'est alors que les larves de sitaris (les triongulins) entrent en action. Grâce à ses ongles griffus, chaque triongulin s'agrippe et grimpe sur l'anthophore mâle pour y vivre en parasite. Lorsqu'une femelle anthophore naît et s'accouple, le triongulin opère ainsi un transfert en s'installant sur la femelle. Puis il attend le moment propice pour pénétrer dans la loge à miel. C'est le cas au moment de la ponte de l'anthophore. Le petit triongulin s'accroche alors à l'œuf, profitant de celui-ci pour entrer dans la loge à miel. Et l'abeille, croyant mettre ses petits en sûreté, referme solidement sa loge. En réalité, elle scelle, sans le savoir, le destin funeste de sa progéniture. Voilà le loup enfermé dans la bergerie !

Mais le triongulin n'aime pas le miel, et s'il tombait dedans, se noierait instantanément. D'où ce paradoxe : pour se nourrir, la larve doit attaquer sa « planche de salut ». La voilà qui se nourrit de l'œuf de l'anthophore. Plus elle se rapproche du miel, plus la larve grandit et plus elle évolue. Après avoir dévoré la totalité de son œuf-hôte, le triongulin a entièrement changé de forme et de mœurs. Dépouillé de son enveloppe de triongulin, il devient une larve gourmande de miel. Voici la nouvelle larve qui plonge dans ce lac doré naguère mortel pour elle et s'en nourrit voracement. Enrichie de cette nouvelle nourriture, la larve grandit encore et finit par se métamorphoser en sitaris adulte. Celui-là même qu'Henri Lacaze-Duthiers s'étonnait de voir sortir de loges étanches.

Un instinct d'une précision remarquable

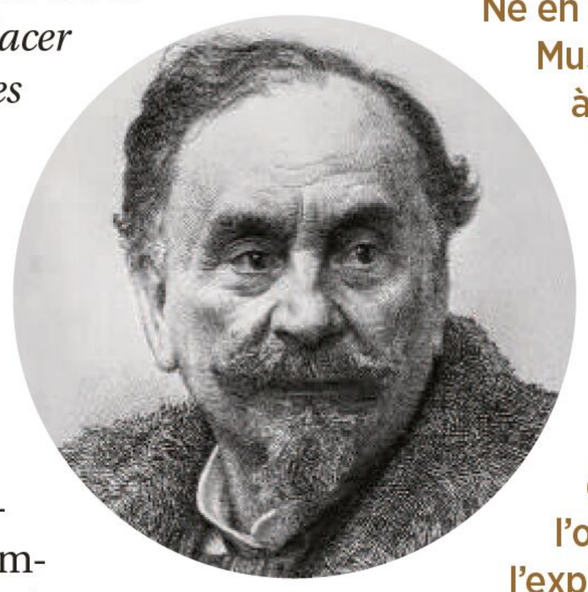
« *La nature, en ce petit insecte, a déployé des ruses dignes des plus habiles stratagèmes* », note Henri Lacaze-Duthiers lors du congrès de 1889 à Paris. L'exemple du sitaris frappera aussi les philosophes, comme Henri Bergson, qui y verra l'illustration d'un instinct d'une précision remarquable. En effet, dans son ouvrage *L'Évolution créatrice* publié en 1907, Henri Bergson s'appuie sur de nombreux exemples empruntés à l'entomologie pour montrer que l'instinct animal ne se réduit ni à un automatisme mécanique, ni à une forme primitive d'intelligence humaine. L'instinct n'est pas une pensée réflexive, mais une mise en action ajustée à un milieu précis.

L'histoire du triongulin en offre une illustration saisissante. Cette larve accomplit une suite d'actions d'une précision extrême sans jamais « savoir » ce qu'elle fait au sens intellectuel du terme. Pourtant, tout se déroule comme si l'organisme était intimement adapté à la situation. Pour Henri Bergson, un tel comportement révèle que l'instinct est une connaissance incorporée, inscrite non pas dans l'esprit, mais directement dans l'organisme. Nul besoin de se représenter le monde abstraitement, lorsque l'instinct permet d'y agir de manière adéquate. On voit alors comment la méthode expérimentale en zoologie ouvre la porte à une philosophie du vivant qui conçoit une intelligence du corps.

Le cycle « romanesque » du triongulin, en tout état de cause, démontre qu'il n'est pas une espèce

PORTRAIT

Henri de Lacaze-Duthiers, sommité de la zoologie française



Né en 1821, Henri de Lacaze-Duthiers devint professeur au Muséum national d'histoire naturelle à Paris en 1865, puis à la Sorbonne en 1868. Élu à l'Académie des sciences en 1871, il fonda les stations marines de Roscoff (1872) et de Banyuls-sur-Mer (1881), véritables laboratoires tournés vers la mer où l'on observe les organismes en activité. En 1872, il lance les *Archives de zoologie expérimentale et générale*, revue périodique phare qui structure la discipline. Grâce à lui, la zoologie sort des musées et devient expérimentale. Finies les études sur dépouilles conservées dans du formol, place à l'observation directe des êtres vivants et à l'expérimentation dans leur milieu naturel.

BRIDGEMAN IMAGES

à part entière. *« C'est là, il n'en faut pas douter, l'une des observations les plus remarquables de la zoologie de cette époque,* soutient Henri Lacaze-Duthiers lors de cette même conférence, *et qui montre bien que, pour caractériser les êtres et chercher leurs rapports, il faut suivre leur évolution, car sans cela on s'expose à placer dans des groupes distincts les jeunes et les adultes d'une même espèce.* »

Cette histoire entomologique illustre le profond changement de regard qui s'opère dans la seconde moitié du XIXe siècle. Les naturalistes ne se contentent plus de décrire les formes : ils observent désormais les transformations, les comportements et les relations des êtres vivants avec leur milieu. Peu à peu, la zoologie descriptive cède la place à une science du vivant en action. Comprendre un être, c'est désormais le suivre dans son histoire et son milieu. Trois dimensions s'imposent alors : le temps, où l'animal apparaît comme une succession d'états ; l'espace, qui le relie à un environnement concret ; l'action, qui donne sens aux transformations observées. *« Décrire n'est pas tout,* écrira Henri Lacaze-Duthiers quelques années après ces observations *: il faut voir l'être dans sa vie, dans ses changements, dans ses relations.* »

L'obligation de revoir les fondements mêmes du vivant

L'affaire du sitaris dévoile ainsi un changement de perspective fondamental, qui a eu des conséquences sur notre manière d'appréhender le vivant aujourd'hui. En montrant qu'une même espèce peut passer par des formes larvaires radicalement différentes, elle oblige les naturalistes à revoir les fondements mêmes de la classification du vivant. La forme visible à un instant donné ne suffit plus à définir une espèce. Il faut désormais suivre l'organisme tout au long de son développement. Cette exigence ouvre la voie à une zoologie attentive aux cycles de vie, aux métamorphoses et aux interactions, et non plus seulement aux caractères morphologiques et anatomiques figés. L'étude du sitaris contribue ainsi à faire émerger une biologie du développement et de la transformation, dans laquelle l'identité d'un être vivant ne se réduit pas à une apparence fixe, mais se comprend comme une trajectoire. Plus largement, elle rappelle que l'observation ponctuelle peut conduire à des erreurs, et que seule une enquête prolongée, inscrite dans le temps, permet d'accéder à la réalité des processus biologiques.

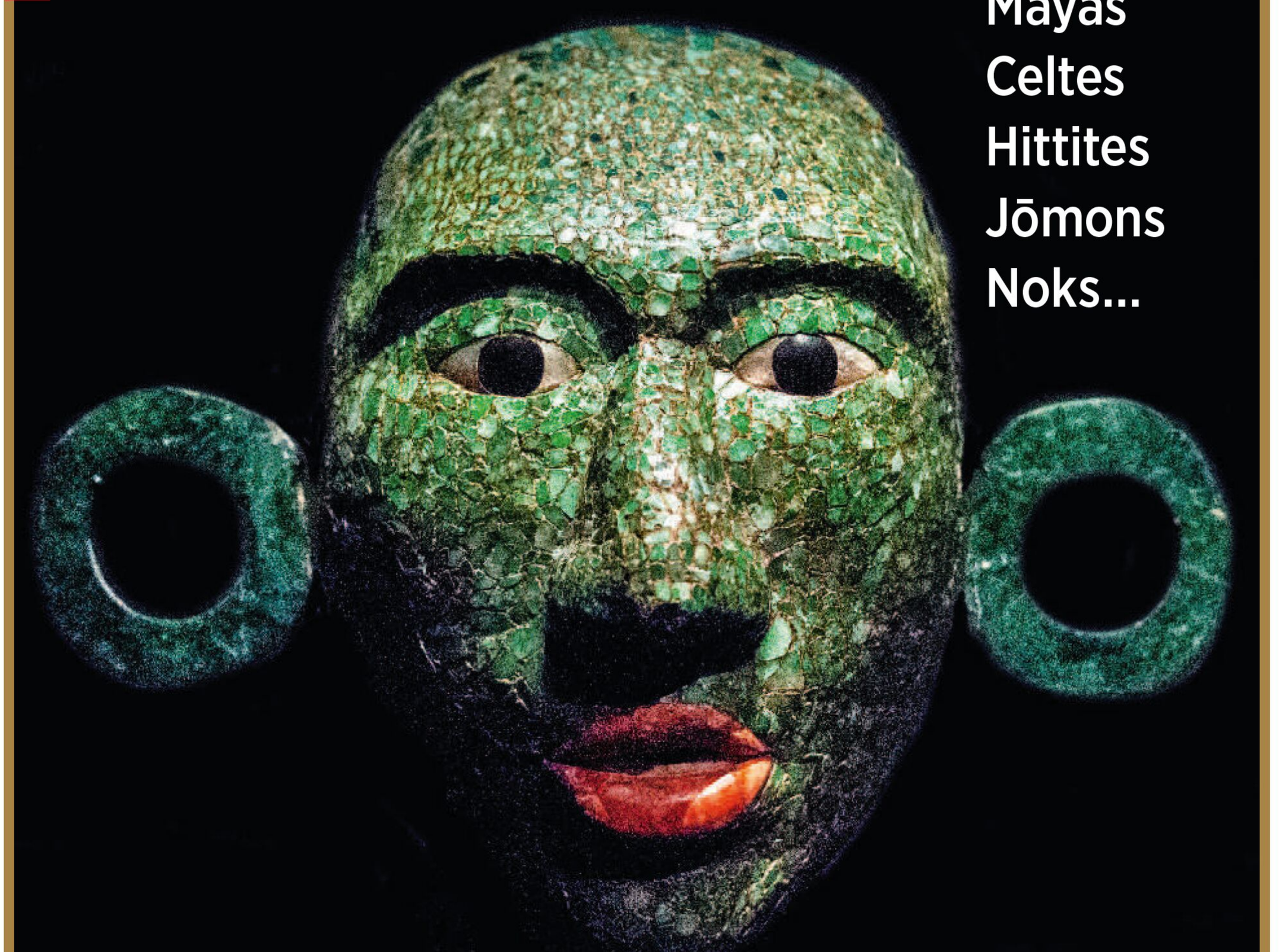
L'étude du sitaris contribue à faire émerger une biologie du développement et de la transformation, dans laquelle l'identité d'un être vivant ne se réduit pas à une apparence fixe

Derrière la transformation du triongulin se cache aussi une question vertigineuse : qu'est-ce qu'un fait scientifique ? Existe-t-il indépendamment de notre regard, attendant simplement les bons outils pour être révélé, ou naît-il des méthodes et des cadres qui le rendent possible ? L'histoire du sitaris montre que la science ne progresse pas seulement en affinant sa vue, mais aussi en changeant son regard. Ce que nous appelons un « fait » dépend toujours du cadre à travers lequel nous définissons l'objet observé. En observant et suivant l'évolution de la vie dans son milieu, les zoologistes de la seconde moitié du XIXe siècle ont déplacé la frontière du visible et redéfini les méthodes et les objectifs de la zoologie. La vérité scientifique n'est pas une donnée figée qui attend d'être découverte. Elle se reconfigure sans cesse, au rythme des nouvelles façons d'interroger le réel. ■

Chez votre marchand de journaux

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS SCIENCES ET AVENIR

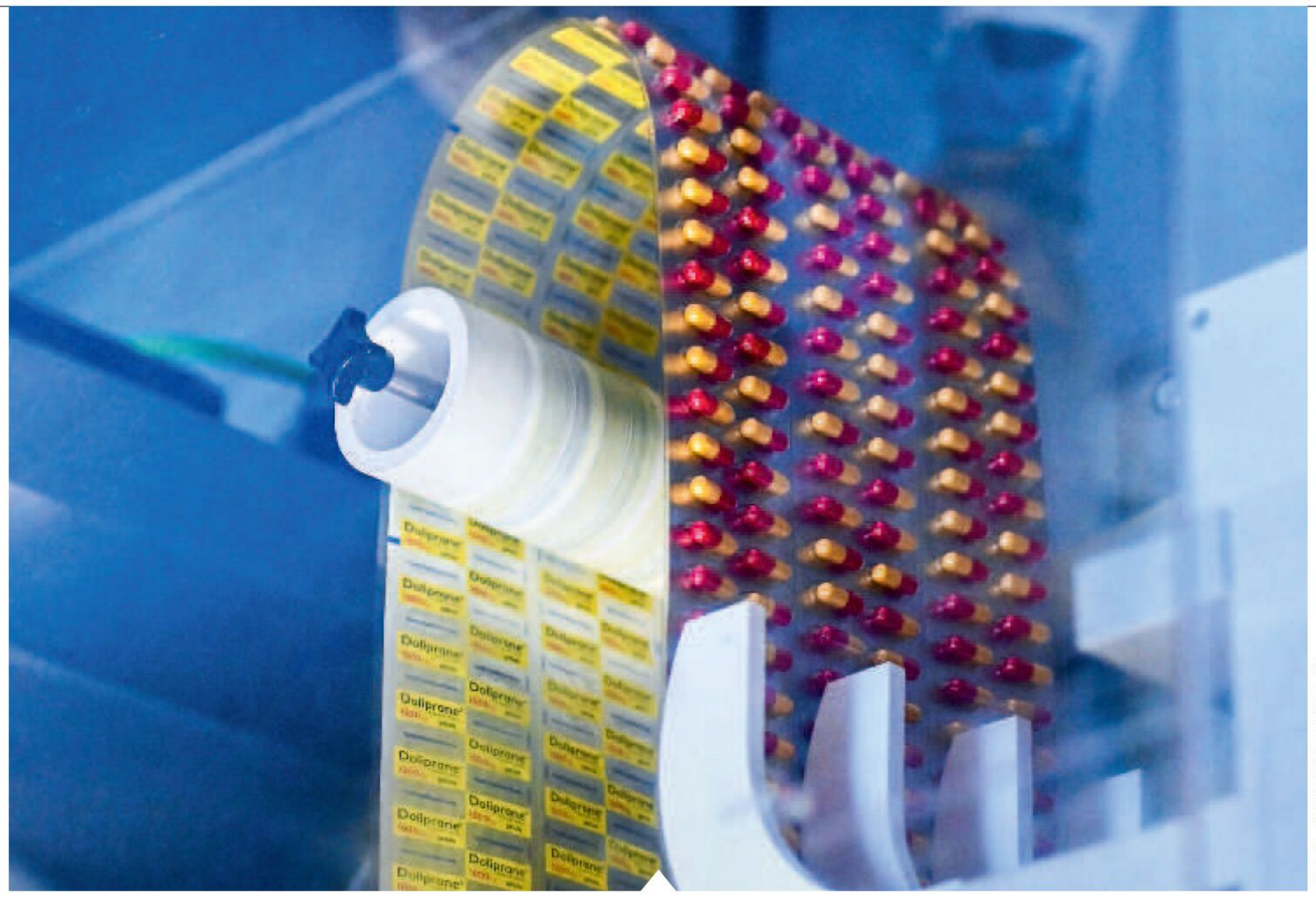


Mayas
Celtes
Hittites
Jōmons
Noks…

Nouveaux regards sur

LES CIVILISATIONS DISPARUES

FRANÇOIS GUÉNET/DIVERGENCE



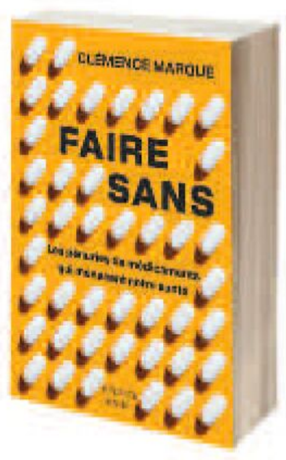
CASTEL.FRANCK/ABC/ANDIA.FR

Le paracétamol, couramment employé, mais aussi des traitements plus spécifiques ont connu ces dernières années des ruptures de stock ou d'approvisionnement.

Dépasser le tout-médicament

Face à la multiplication des pénuries de médicaments, dont elle décrypte les causes structurelles, Clémence Marque propose un nouveau modèle où prévention et sobriété sont placées au cœur des priorités.

SANTÉ Les pénuries de médicaments se sont multipliées en France au cours des deux dernières décennies, au point que, en 2024, ce problème a concerné 39 % des Français (baromètre France Assos Santé). Pourquoi ces crises surviennent-elles, et comment y mettre fin ? Docteure en pharmacie et forte d'une expérience de plus de deux décennies dans et avec l'industrie pharmaceutique, Clémence Marque entreprend de décortiquer, dans cet ouvrage ultradidactique et très bien sourcé, le fonctionnement du monde du médicament. Elle montre comment ces pénuries — terme parapluie qui englobe également les ruptures de stock ou d'approvisionnement — touchent aussi bien des traitements du quotidien (paracétamol, antibiotiques type amoxicilline) que des médicaments plus spécifiques (prescrits dans le cadre d'un cancer, d'une maladie chronique, etc.). Comment l'obsession de la performance — optimisation des coûts, de la production, des rendements, etc. — et l'avènement des génériques nous ont rendus extrêmement dépendants vis-à-vis d'une multitude d'autres pays, fragilisant nos capacités d'approvisionnement. Ou encore, comment notre mauvais usage des médicaments aggrave le problème.



Mais Clémence Marque ne se contente pas de ce diagnostic très précis et accablant. Elle avance un certain nombre de pistes concrètes pour réformer en profondeur notre modèle actuel. Mieux, elle plaide pour *« une autre vision du soin »*, au-delà du tout-médicament, plaçant la prévention et la sobriété au cœur des priorités. Son livre s'impose ainsi comme une contribution très pertinente sur l'un des grands défis sanitaires de notre époque. ■

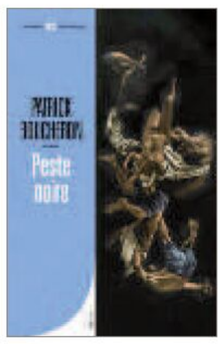
Vincent Glavieux

Faire sans. Les pénuries de médicaments qui menacent notre santé, Clémence Marque, Actes Sud, 224 p., 21,50 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Questions de lecteurs p. 94
▶ Courrier p. 95
▶ Le ciel du mois p. 96
▶ À retrouver sur notre site p. 98

Autopsie d'un cataclysme

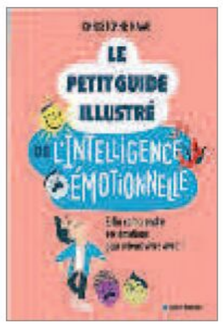


HISTOIRE La peste noire, qui s'est diffusée en Europe entre 1347 et 1352, aurait emporté plus de 60 % de la population du continent. Prenant appui sur les travaux les plus récents en archéologie funéraire, anthropologie, microbiologie et sciences de l'environnement, l'historien Patrick Boucheron renouvelle notre compréhension de cette catastrophe sanitaire majeure, qu'il s'agisse de ses mécanismes d'infection et de diffusion, ou de ses conséquences sur les sociétés de l'époque. Une enquête aussi érudite que captivante. ■ **V. G.**

Peste noire, Patrick Boucheron, Seuil, 576 p., 27 €

Vivre avec ses émotions

GUIDE Si vous éprouvez des difficultés à identifier vos émotions, sachez que c'est le cas de la moitié de la population ! Et si, en plus, vous parveniez à faire de vos émotions votre plus grande force ? C'est l'ambition de Christophe Haag, chercheur en psychologie sociale : dans un langage très accessible, et à l'aide de multiples exercices, ce guide illustré fournit toutes les clés pour développer son quotient émotionnel, afin d'améliorer son bien-être. ■ **L. L.**



Le Petit Guide illustré de l'intelligence émotionnelle, Christophe Haag, Albin Michel, 200 p., 20 €

Pionnier des lasers

PARCOURS Prix Nobel de physique 2018, Gérard Mourou raconte une aventure scientifique hors norme : la mise au point des lasers ultrarapides et les débouchés d'une technologie qui a notamment révolutionné l'ophtalmologie. À la croisée de l'autobiographie et de l'histoire des sciences, le physicien retrace le chemin qui l'a conduit au Nobel, mais s'attache surtout aux perspectives ouvertes par ses travaux, de la fusion nucléaire à la médecine. Des mémoires résolument tournées vers l'avenir. ■ **F. N.**

Lumière extrême, Gérard Mourou, Tana Éditions, 160 p., 18,90 €

Une société sous addiction

MIROIR Camille Charvet est psychiatre au centre d'addictologie de l'hôpital Marmottan à Paris, où elle reçoit en consultation des personnes dépendantes aux drogues licites et illicites. Elle observe ces « assoiffés » avec empathie et respect. Issus de tous les milieux, qu'ont-ils en commun, au-delà de la recherche d'un plaisir qui va s'estompant au fur et à mesure que les doses augmentent ? Tous semblent avoir une relation désaccordée avec les autres et avec eux-mêmes. Le livre va au-delà de la galerie de portraits. Il tisse plusieurs fils, pharmacologique, historique, philosophique. Le ton fluide de Camille Charvet nous parle de détournement de médicaments, de santé mentale et de système de soins défaillant. Ses patients concentrent en eux les injonctions de l'époque : un tissu social où se fondre à tout prix et un monde *« puissamment addictogène »* qui inocule le besoin d'immédiateté et la peur de la frustration. Sommes-nous si différents d'eux ? ■

Astrid Saint Auguste

Les Assoiffés, Camille Charvet, Grasset, 236 p., 20 €

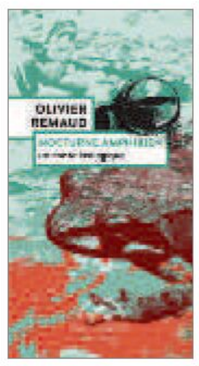
Trafic d'antiquités

ENQUÊTE « L'affaire qui a éclaboussé les plus grands musées du monde », clame la couverture, où campe le sarcophage doré du grand prêtre Nedjemankh. Exposé au Metropolitan Museum de New York, aux États-Unis, en 2018, et provenant d'un pillage daté de 2011 en Égypte, l'objet sera restitué au Caire, avec des excuses, en 2019. Le destin de ce chef-d'œuvre, dont le rocambolesque parcours de provenance falsifiée est remonté pas à pas, est aussi emblématique que celui de la précieuse stèle mentionnant Toutankhamon et vendue au Louvre Abou Dhabi (Émirats arabes unis) en 2016, accompagnée d'une fausse facture, par un expert bien établi à Paris et aux pratiques troubles. Cette enquête diablement documentée et construite comme un thriller démarre par la garde à vue de Jean-Luc Martinez, ancien directeur du Louvre (2013-2021). Elle restitue les agissements reliant marchands, collectionneurs, conservateurs de musée, soupçonnés de falsifications et trafics d'objets aux provenances obscures. Édifiant ! ■ **Andreina de Bei**

L'Or pillé des pharaons, Vincent Noce, Buchet Chastel, 288 p., 22,50 €

Éloge des mondes aquatiques

VOYAGE Dans cet ouvrage à l'écriture poétique, l'auteur — spécialiste des usages du monde et des milieux de vie à l'EHESS — nous livre une sensible leçon de choses sur le monde amphibien. Cela commence par un rêve où une grenouille le choisit comme témoin et allié, à l'heure où nombre d'espèces ont déjà disparu. Il se glisse alors dans la peau d'un de ses congénères pour un voyage à travers les âges et la diversité des milieux aquatiques, avant de mener dans un deuxième temps une enquête scientifique pour décrire les li ens qui nous unissent aux terres d'eau. ■ **S. R.**



Nocturne amphibien, Olivier Remaud, Actes Sud, 160 p., 19,50 €

C'EST À VOIR

▶ **Ce symbole désigne les nouvelles expositions**

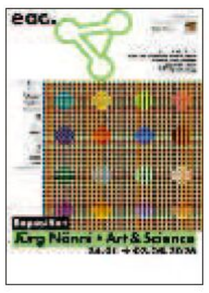
EXPOSITIONS

Bordeaux (33)

Le trésor des bâtisseurs
Cette « expédition immersive » en réalité virtuelle fait découvrir le chantier de la pyramide de Kheops. Elle intègre les dernières découvertes scientifiques sur le sujet.
Lire notre reportage : sciav.fr/949kheops
Espace Eclipso, 19-21 rue Saint-Sernin. Rens. : 05.33.09.61.07.

Houilles (78)

▶ **Faites des vagues**
La deuxième édition de cet événement consacré à l'océan se focalise sur les forêts marines (ateliers, films, débats). Ce milieu méconnu, car par définition invisible, abrite des milliers d'espèces et est essentiel pour l'équilibre du vivant.
Dôme, 8, rue Félix-Toussaint, du 25 mars au 1er avril. Rens. : 06.81.66.01.15.



Mouans-Sartoux (06)

▶ **Jürg Nänni : Art & Science**
Première rétrospective française de l'œuvre du physicien suisse Jürg Nänni (1942-2019). Mathématiques et précision géométrique orchestrent des compositions chromatiques générées par ordinateur.
Espace de l'Art concret, château de Mouans, jusqu'au 3 mai. Rens. : 04.93.75.71.50.

Nantes (44)

▶ **Sorcières, de l'Antiquité à nos jours**
C'est l'histoire de l'une des plus importantes persécutions de l'histoire : celle des femmes accusées de sorcellerie à travers les siècles. Le parcours examine les origines de la figure de la sorcière, entre réalité et fantasmes.
Château des ducs de Bretagne, 4, place Marc-Elder, jusqu'au 28 juin. Rens. : 08.11.46.46.44.

▲ **Disposition** alternative de touches de clavier d'ordinateur inventée par Claude Marsan en 1976.

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS CNAM, JEAN-BAPTISTE TAISNE

Paris (75) / Exposition

Flops ?! Oser, rater, innover

Première machine à calculer mécanique de l'histoire, la Pascaline inventée par Blaise Pascal en 1645 a en fait été un échec : trop chère et pas assez fiable. La voiture DeLorean DMC 12, vénérée des cinéphiles depuis le film *Retour vers le futur* en 1985, a aussi été un cuisant raté commercial entre 1981 et 1983. Ces deux objets figurent parmi une quantité foisonnante d'appareils high-tech, de gadgets, de jouets, de projets d'ingénierie, de moyens de transport, qui sont autant d'exemples de l'échec en matière d'innovation. Le parcours est découpé en chapitres rassemblant les pièces selon les raisons de leur insuccès : raté technique, usage mal pensé, procès pour plagiat voire imbroglios technico-politiques (le projet de transport public Aramis de la RATP dans les années 1970). Ou alors, des innovations arrivent trop tôt.
Ou n'ont pas vraiment de public. Mais il n'y a pas de fatalité : imaginée dès les années 1920, la visiophonie accumulera les faux départs… avant de s'imposer en 2020 dans le contexte de la pandémie de Covid-19. Lire notre reportage : sciav.fr/949flops ■ **Arnaud Devillard**

Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, jusqu'au 17 mai. Rens. : 01.53.01.82.63.

Paris (75)

▶ **Voyage au pays des aurores polaires**
De leur formation à leur observation, les aurores boréales sont le sujet de ce nouveau spectacle du planétarium. Les images, captées en Norvège et depuis la Station spatiale internationale, sont commentées par un médiateur scientifique.
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou. Rens. : 01.85.53.99.74.

▶ **Machine arrière #2 : la machine à écrire**
Deuxième exposition d'une série de trois sur des techniques du passé, celle-ci se focalise sur la machine à écrire. Un outil des années 1930 qui influence encore nos usages des ordinateurs et des smartphones.
Lire notre reportage : sciav.fr/949machine
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'en octobre. Rens. : 01.85.53.99.74.

Pont-Aven (29)

▶ **Jean Painlevé, les pieds dans l'eau**
Pionnier du cinéma scientifique, Jean Painlevé (1902-1989) a consacré sa vie à filmer la vie marine, dans un style unique entre science et poésie.
Une trentaine de ses films

sont présentés, ainsi que des photographies et documents.
Musée de Pont-Aven, place Julia, jusqu'au 31 mai.
Rens. : 02.98.06.14.43.

Strasbourg (67)

▶ L'état sauvage

Une confrontation entre des spécimens naturalisés du Musée zoologique et des œuvres d'art du musée d'Art moderne et contemporain questionne notre rapport, ambigu et complexe, au monde animal.
Musée d'Art moderne et contemporain, 1, place Hans-Jean-Arp, jusqu'au 12 juillet.
Rens. : 03.68.98.50.00.

▶ Un passé incontournable, découvertes archéologiques de l'A355

Les fouilles préventives réalisées avant la construction du contournement ouest de Strasbourg ont révélé plus de 200 sites d'occupation humaine, allant du paléolithique moyen à la Première Guerre mondiale.
Musée archéologique, 2, place du Château, jusqu'au 21 juin.
Rens. : 03.68.98.50.00.

Troyes (10)

▶ Lavau, un prince celte en bord de Seine

Découverte en 2015 dans l'Aube, cette sépulture du v^e^ siècle avant notre ère est exposée avec tout son contexte, également accompagnée d'un décryptage de la démarche archéologique.
Musée d'Art moderne, 14, place Saint-Pierre, jusqu'au 21 juin.
Rens. : 03.25.76.26.80.

Villeneuve-d'Ascq (59)

▶ Les mondes oubliés des Hauts-de-France

Une exploration des richesses géologiques qui ont façonné la région sur 500 millions d'années, comme la craie du Boulonnais, le charbon du bassin minier ou les calcaires de l'Oise.
Forum des sciences, 1, place François-Mitterrand, jusqu'au 30 août.
Rens. : 03.59.73.96.00.

Saint-Denis (93) / Exposition

La fabrique de la flèche

Moins médiatisée que la restauration de Notre-Dame de Paris, la reconstruction de la flèche surmontant la tour nord de la basilique Saint-Denis est en cours pour cinq ans. Fragilisé par les intempéries, l'édifice avait été déposé en 1847 et jamais rebâti depuis. Une exposition protéiforme jouxte le chantier. Une galerie muséale classique raconte l'histoire de la basilique, avec diverses bornes interactives, et une vaste salle immersive se consacre, de manière plus artistique, au destin de la flèche. Des projections sur quatre murs mêlent dessins, archives, jeux de lumière, images réelles au drone… Impressionnant. Lire notre reportage : sciav.fr/949fleche ■ **A. D.**
Basilique, 1, rue de la Légion-d'Honneur. Rens. : ww2.suivezlafleche.com/visites

AGP

La basilique dyonisienne avec sa tour nord en chantier.

PARTENARIAT SCIENCES ET AVENIR

La Nuit du quantique
Cet événement de la Société française de physique se tient dans le cadre de l'année internationale des sciences et technologies quantiques. Il se déroule dans 13 villes, avec expos, conférences…
À Bordeaux, Bourges, Clermont-Ferrand, Dijon, Dunkerque, Grenoble, Le Havre, Limoges, Lyon, Marseille, Toulouse, Tours et Paris, le 31 mars.
Rens. : 01.44.08.67.10.

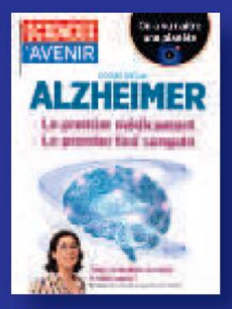
Scannez ce QR code pour retrouver toutes les expositions

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 940
Comment Sapiens a conquis le monde

N° 941-942
Les 25 grandes découvertes



N° 943
Dossier spécial Alzheimer

N° 944 Seuls ?
À la recherche de la vie ailleurs

N° 945 La science peut-elle sauver le climat ?

N° 946 Les géniales "erreurs" d'Einstein

N° 947
Spécial Aux origines

N° 948 La nouvelle conquête de la Lune

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir - service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 940 ❑ N° 941-942 ❑ N° 943 ❑ N° 944
❑ N° 945 ❑ N° 946 ❑ N° 947 ❑ N° 948

Nom : . . . . . .
Adresse : . . . . . Ville : . . . . . .
. . . . . .
Code postal : . . . . . .

Posez vos questions sur la page **Facebook** de **Sciences et Avenir**

IMAGEBROKER/ANDIA.FR

Si le cerveau est en plein remodelage au cours de l'adolescence, 80 % des jeunes vivent bien cette transition.

NEUROSCIENCES

Qu'est-ce qui provoque la « crise » d'adolescence ?

Isabelle L.

Les adolescents seraient égocentriques, paresseux, irrationnels, inconscients du danger… Tous ces clichés ont la vie dure. Pourtant, comme le rappelle le sociologue Michel Fize, l'adolescence ne se résume pas à une « crise » : *« L'immense majorité des jeunes (80 %) se portent bien et sont satisfaits de grandir. L'adolescence est une période de créativité intense, d'exploration intellectuelle, notamment avec la manipulation des nouvelles technologies. »*

Sur le plan biologique, l'adolescence correspond à un vaste remodelage du cerveau. À partir de la puberté, les circuits neuronaux se réorganisent selon deux grands mécanismes. D'abord, l'élagage synaptique, qui consiste à éliminer progressivement certaines connexions entre neurones afin de renforcer les réseaux les plus efficaces. Ensuite, la myélinisation, un processus par lequel les fibres nerveuses s'entourent d'une gaine accélérant la transmission de l'influx nerveux. Le cerveau gagne ainsi en efficacité et en spécialisation, mais cette maturation se fait de manière progressive.

Certaines zones comme le cortex préfrontal, impliqué dans la planification, la prise de décision et le contrôle des impulsions, figurent parmi les dernières à atteindre leur pleine maturité — souvent au début de l'âge adulte. Le pédopsychiatre américain Jay Giedd le souligne : *« Il est injuste d'attendre des adolescents des capacités d'organisation ou de décision pleinement adultes alors que leur cerveau est encore en construction. »* Pour autant, les neurosciences récentes nuancent l'idée d'une adolescence systématiquement impulsive. Tous les adolescents ne prennent pas de risques, et ces comportements dépendent fortement du contexte émotionnel, social et relationnel, notamment de l'influence des pairs. Toutefois, cette période de plasticité cérébrale accrue rend le cerveau plus vulnérable aux substances psychoactives. L'alcool et le cannabis, en particulier, peuvent perturber durablement le développement de la matière blanche et certaines fonctions cognitives. D'où l'importance, rappelle le pédopsychiatre Olivier Phan, d'un accompagnement parental, à la fois présent et non intrusif. Car contrairement à l'idée reçue, les adolescents ne se détournent pas des adultes : ils en ont encore profondément besoin. ■

Lise Loumé

ZOOLOGIE

Les animaux peuvent-ils avoir des dents de lait ?

Marc B.

La plupart des mammifères possèdent des dents de lait, comme l'humain, le chien ou le chat. Ces dents servent surtout à s'adapter à une mâchoire encore trop petite et à une alimentation juvénile plus molle. Les cétacés (dauphins, orques, cachalots), eux, ne possèdent qu'une seule dentition fonctionnelle au cours de leur vie : une ébauche de dents temporaires peut apparaître au stade embryonnaire, mais elle est résorbée avant la naissance et ne joue aucun rôle. À l'inverse, certains animaux renouvellent leurs dents en continu, comme les alligators, ou encore les requins, qui sont capables de produire des milliers de dents au cours de leur vie ! ■ **L. L.**

MÉTÉOROLOGIE

Quelle est la différence entre une dépression et un anticyclone ?

Sophia A.

La différence tient à la pression atmosphérique (le poids exercé par la colonne d'air au-dessus de nous) et aux mouvements de l'air associés. Un anticyclone correspond à une zone de hautes pressions, supérieures à 1013 hectopascals (hPa) : l'air y descend, se réchauffe et s'assèche, favorisant un ciel dégagé et des vents faibles. À l'inverse, une dépression est une zone de basses pressions : l'air chaud y monte, se refroidit et condense sa vapeur d'eau, formant nuages, pluie et parfois orages, avec des vents plus marqués. ■ **L. L.**

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Aux fondations de la lignée humaine »
(*Sciences et Avenir* n° 947, janvier 2026)

J'ai constaté en lisant le numéro spécial « Aux origines » des incohérences concernant la théorie de l'évolution. Par exemple, vous représentez différents groupes *(p. 33)* en laissant croire qu'ils ont une filiation. De même, dans le groupe *Homo* il y a l'*Homo sapiens* et l'*Homo neanderthalensis*, alors qu'une analyse génétique en 2016 d'une dent d'un néandertalien a montré qu'il lui manquait le chromosome Y propre à l'humain, on doit donc parler maintenant du grand singe de Neandertal.

Gérard Gertoux

S. et A. : Vous l'avez bien compris, on ne peut pas établir de filiation entre toutes les espèces humaines. C'est la théorie du buisson. D'ailleurs le schéma p. 33 présente les différentes espèces d'hominines sans les inclure dans un arbre, c'est-à-dire sans établir de relation de filiation entre elles. En revanche, Neandertal est un humain. La preuve en est : la plupart des *Homo sapiens* actuels détiennent un petit héritage de Neandertal — pour les descendants d'Européens environ 2 % du génome. Il y a eu donc des enfants nés de couples Neandertal-*sapiens* ! Et ces enfants sont nos ancêtres.

Covid long

Votre article du n° 948 concernant le bénéfice des vaccins anti-covid à long terme permet de clouer le bec aux sinistres complotistes, et c'est très positif ! Cependant qu'en est-il des victimes de Covid long qui se trouvent en proie au syndrome de fatigue chronique ou encéphalomyélite myalgique dont la vie est puissamment altérée ? Est-ce un effet de la maladie elle-même ou bien un dommage collatéral des vaccins ? **Didier Carme**

S. et A. : Avec plus de 200 symptômes potentiels différents d'un patient à un autre, l'hétérogénéité de la maladie et l'absence de biomarqueur ou test diagnostic fiable rendent le Covid long très difficile à définir, comprendre et traiter. Une chose est certaine cependant, le vaccin n'y est pour rien. Au contraire, une étude de 2022 (*Nature Medicine*) montre que les non-vaccinés ont 50 % de risque en plus que les vaccinés de développer un Covid long lorsque l'infection survient après (et malgré) la vaccination. Les causes sont donc à chercher du côté de l'infection par le virus du Covid-19 lui-même.

Vitesse du Fardier

Dans votre très intéressant article sur le Fardier de Cugnot (*S. et A.* n° 947), première voiture de l'histoire datant de 1771, vous évoquez la reconstitution de ce véhicule en 2010 par l'École nationale supérieure des arts et métiers, en précisant que ce dernier a pulvérisé le record initial, avec 3 km en 45 minutes contre 4 km/h à l'époque… ce qui après vérification, semble revenir exactement au même. **Bruno Bourga**

S. et A. : Effectivement, les deux vitesses sont identiques. Mais dans le premier cas, il s'agissait d'un prototype à taille réduite. Et ce dernier n'a jamais roulé plus d'un quart d'heure. En 1770, rien ne permettait donc de croire que le Fardier de Cugnot fonctionnait réellement. Dans le second cas, il s'agissait d'un Fardier grandeur nature. Même si la vitesse est identique, l'expérience de 2010 est donc importante car elle valide l'invention de Cugnot. Par ailleurs, la réplique n'a pas roulé un quart d'heure mais trois quarts d'heure. C'est en cela qu'elle a pulvérisé un record.

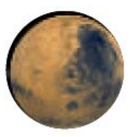
LE CIEL DE MARS

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

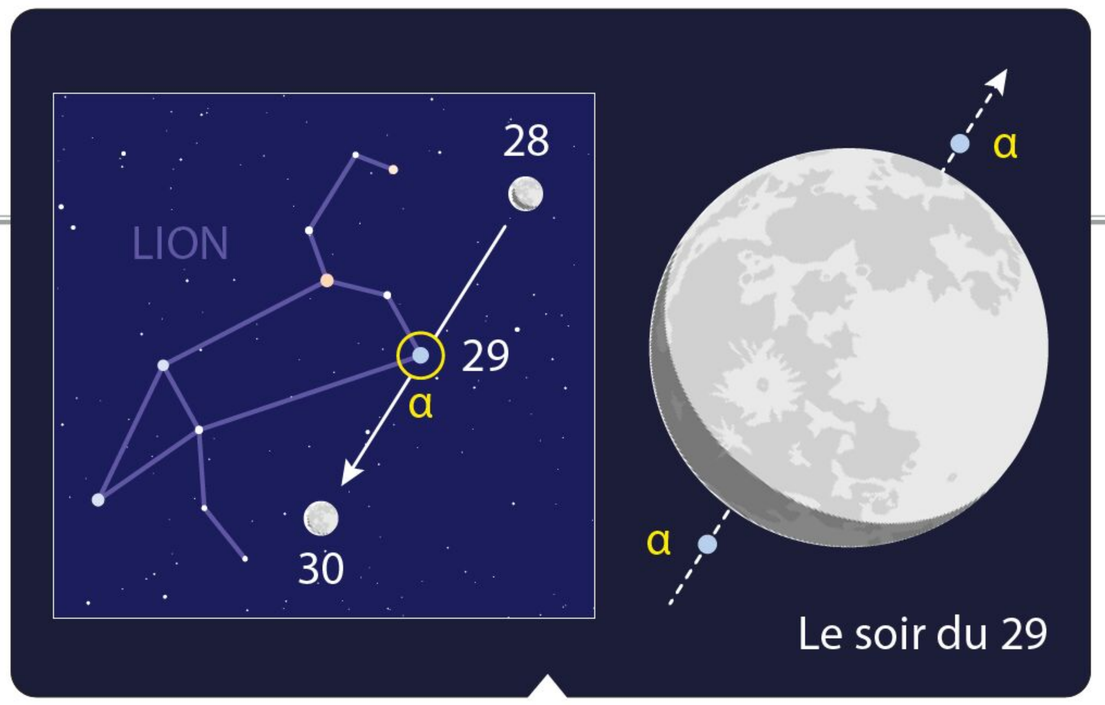
MERCURE
La petite planète passe en conjonction inférieure le 7. Elle n'est pas visible ce mois, noyée dans les lueurs du levant, trop proche de la direction du Soleil pour être repérée.

VÉNUS
L'étoile du Berger est marginalement observable en soirée, très basse vers le couchant. La situation va toutefois s'améliorer au fil des semaines, car la planète s'éloigne progressivement de l'astre du jour.



MARS
Trop proche de la direction du Soleil, la planète Rouge n'est pas observable en mars. Son retour progressif dans le ciel du matin demandera encore un peu de patience.

JUPITER
La planète géante se dévoile à bonne hauteur dès la tombée de la nuit, proche de sa culmination vers le sud.



Configuration de l'occultation de Régulus par la Lune le 29. L'immersion se produit sur la partie sombre du disque lunaire, tandis que l'émersion a lieu sur la partie éclairée.

La Lune occulte Régulus en soirée

LE 29, L'ÉTOILE LA PLUS BRILLANTE DU LION, Régulus, est occultée par la Lune. L'immersion a lieu en fin d'après-midi, dans un ciel encore très lumineux ; dans la moitié occidentale du pays, le Soleil n'est même pas encore couché. L'émersion, visible sur tout le territoire entre 21 h 20 et 21 h 40 environ, se produit à mi-hauteur dans le ciel, vers le sud-est. Les conditions d'observation sont meilleures à l'est du pays, où le ciel est plus sombre en cet instant.

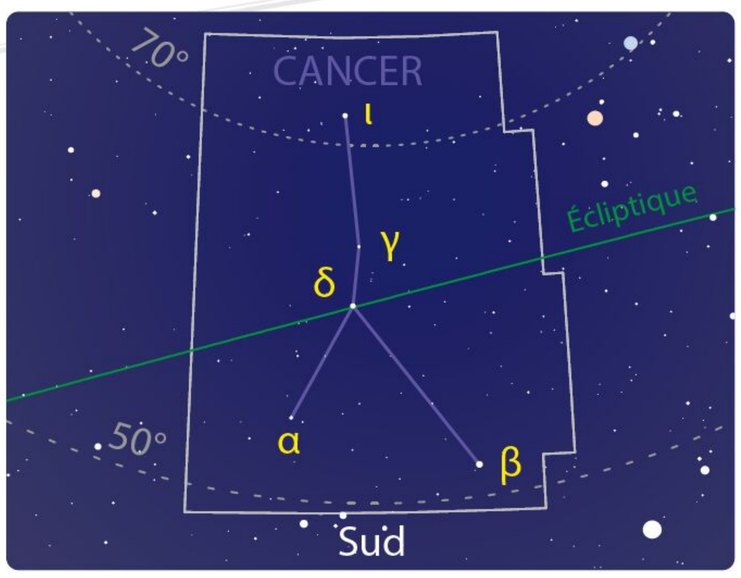
Notre conseil L'observation est possible à l'œil nu, mais des jumelles permettent de mieux apprécier la réapparition de l'étoile.

Très brillante, elle domine largement toutes les étoiles par son éclat. Aucune confusion n'est possible : si, au cours de la nuit, vous voyez un point éclatant dans le ciel, il s'agit de Jupiter !

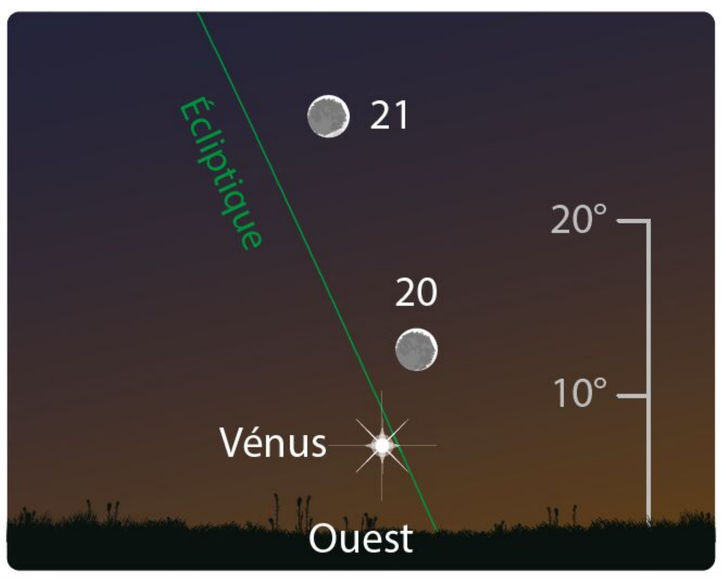
SATURNE
La planète aux anneaux n'est observable qu'en tout début de mois, peu de temps après le coucher du Soleil et très basse sur l'horizon ouest. Elle disparaît ensuite dans les lumières du crépuscule et passe en conjonction avec notre étoile le 25.

L'appli du mois

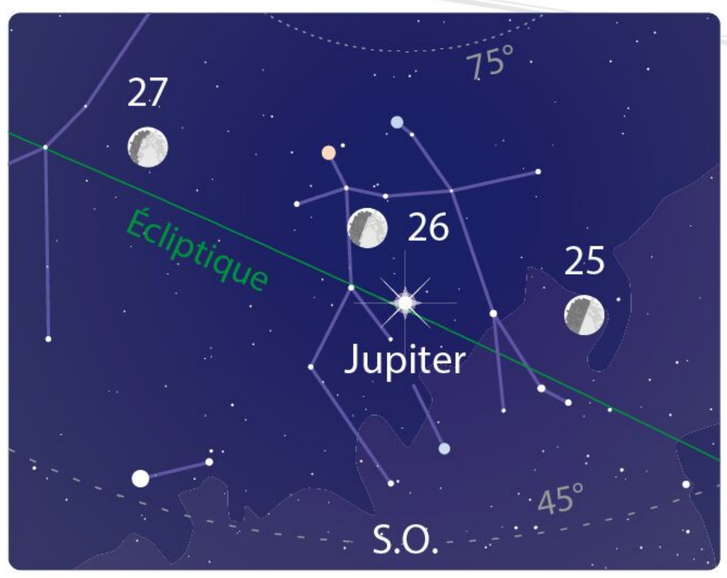
CELESTIA est une application gratuite sur Android et iOS qui permet d'explorer l'Univers en trois dimensions. Ce simulateur spatial affiche en temps réel planètes, satellites, étoiles et galaxies depuis n'importe quel point de l'espace. Utilisée comme planétarium, l'application montre le ciel tel qu'il est vu depuis un lieu donné.



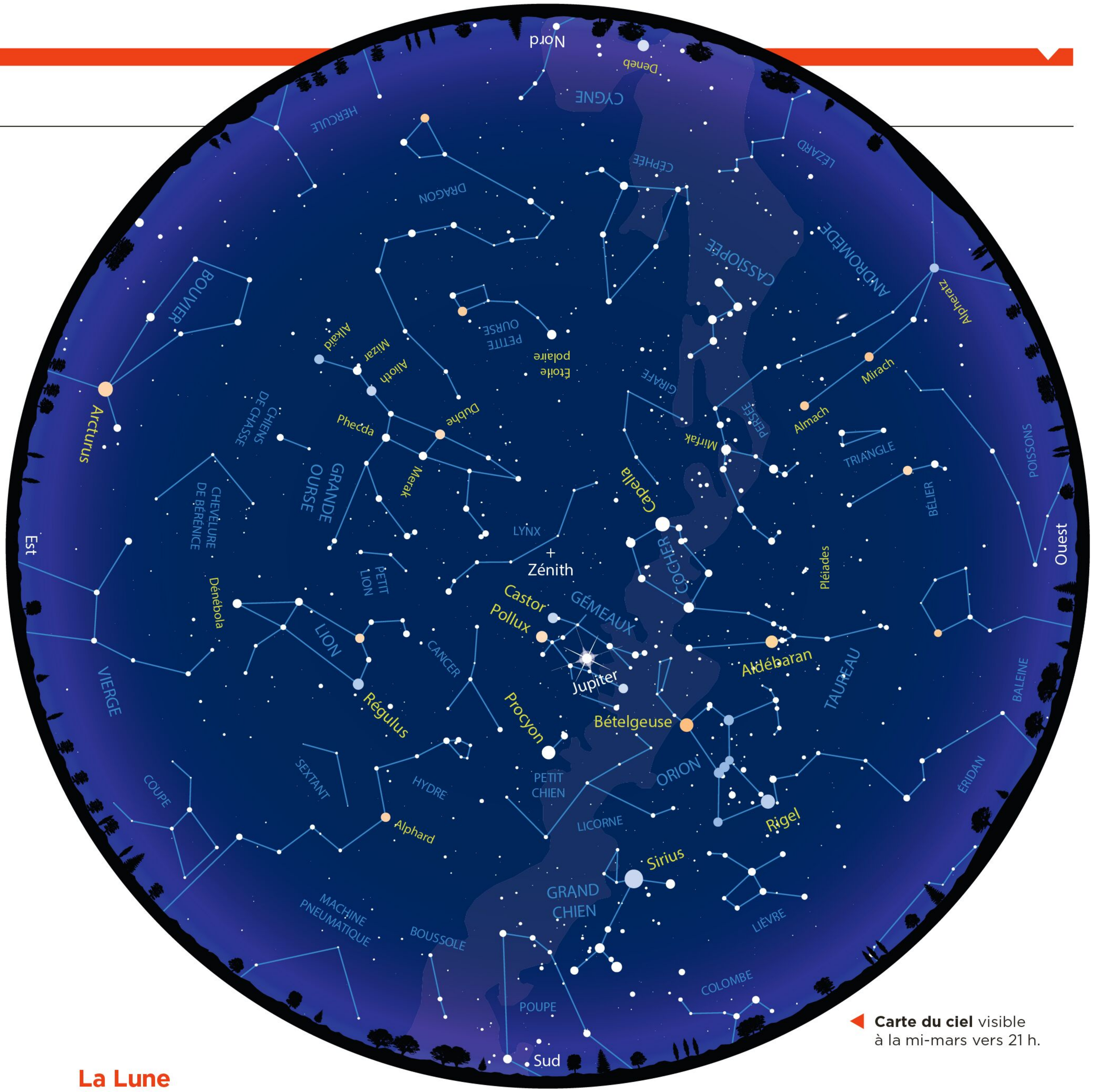
LE CANCER EST UNE CONSTELLATION ZODIACALE PLUTÔT PÂLE, qui trône ce mois dans la direction du sud vers 22 h. Tarf (β) est son étoile la plus lumineuse, suivi par δ, ι, α et γ.



LES 20 ET 21, 45 MIN APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, un fin croissant lunaire en forme de sourire accompagne l'étincelante planète Vénus, bas sur l'horizon ouest.



LE 26, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune en phase gibbeuse se trouve à 5° de Jupiter dans la belle constellation des Gémeaux, haut dans le ciel vers le sud-ouest.



Carte du ciel visible à la mi-mars vers 21 h.

La Lune

Pleine Lune : mardi 3 à 13 h (la Lune se trouve alors dans la constellation du Lion)

Dernier quartier : mercredi 11 à 11 h (Ophiuchus)

Nouvelle Lune : jeudi 19 à 2 h (Poissons)

Premier quartier : mercredi 25 à 20 h (Cocher)

Le Soleil

(à Paris)	Lever	Coucher
1er mars	**7 h 34**	**18 h 33**
31 mars	**7 h 32**	**20 h 18**

Équinoxe de printemps le 20 à 16 h

D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel et plus basse dans le cas contraire.

Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.

Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 1 h jusqu'au dimanche 29 à 2 h, + 2 h ensuite).

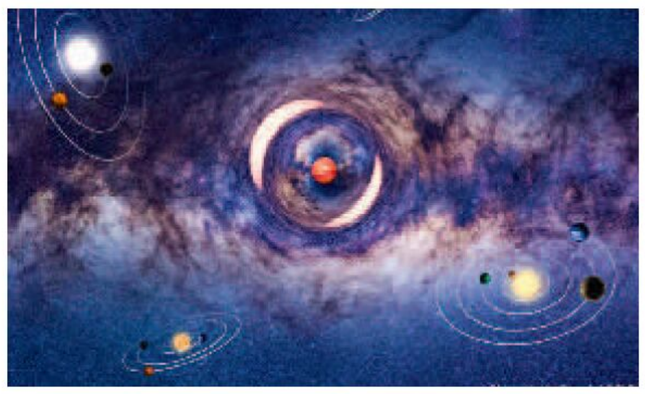
Suivez-nous au quotidien sur le Web

www.sciencesetavenir.fr

MARINE BENOIT/SCIENCES ET AVENIR

ASTRONOMIE

Première mesure d'une planète errante

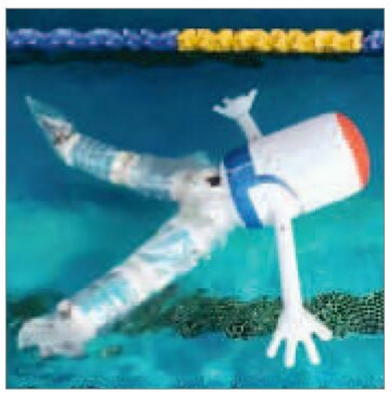


J. SKOWRON, K. ULACZYK/OGLE

Une planète flottant dans l'espace sans attache stellaire, identifiée par microlentille gravitationnelle, a fait l'objet d'une mesure directe de sa masse et de sa distance grâce à des observations simultanées depuis la Terre et le satellite Gaia. **sciav.fr/949errant**

VIDÉO

Ce robot humanoïde marche sur l'eau



LIU ET AL.

Inspirés par les propriétés mécaniques des os humains, des chercheurs ont mis au point un robot humanoïde doté de jambes extensibles et rétractables, reposant sur une structure gonflable souple. À voir en vidéo. **sciav.fr/949robot**

Le top 5 du mois

- ***« C'est une décision très dure »*: le retour d'échantillons martiens annulé** sciav.fr/949marsreturn
- **Des virus tueurs de bactéries dopés par l'apesanteur** sciav.fr/949phages
- **Les risques de la fréquentation des bains publics de Pompéi** sciav.fr/949pompei
- **Les astronautes d'Artemis II voyageront avec leurs clones cellulaires** sciav.fr/949artemis
- **Des astronomes pensent avoir détecté une « superkilonova »** sciav.fr/949superkilonova

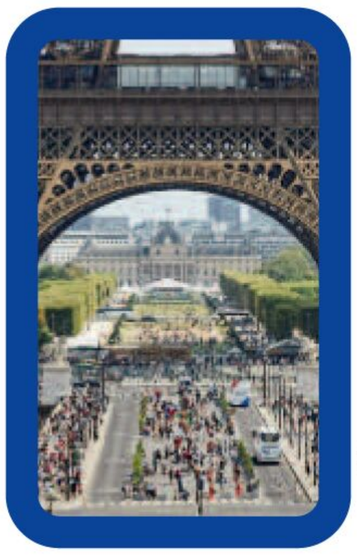
REPORTAGE

Cartographie ancienne : dans les réserves très confidentielles de la BNF

Dans les sous-sols du site historique de la Bibliothèque nationale de France à Paris, *Sciences et Avenir* a eu accès à l'un des lieux les plus secrets du patrimoine français, où sont conservées, à l'abri des regards et des dangers de la lumière, près d'un million de cartes, globes, archives d'expédition, carnets de voyage et autres trésors liés à la cartographie. Reportage vidéo. **sciav.fr/949bnf**

LES SUJETS QUI VOUS FONT RÉAGIR

SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX



AFP

LinkedIn

En 1889, Gustave Eiffel a voulu faire de sa tour un « panthéon des sciences » en y inscrivant le nom de 72 des plus grands savants français. 72 hommes. D'ici à 2027, ils vont être rejoints par autant de femmes ! **sciav.fr/949eiffel**

AFP

Instagram

L'astronaute française Sophie Adenot a décollé vendredi 13 février 2026 à 11 h 15 vers la Station spatiale internationale. Revivez le lancement sur notre site. *(Lire aussi p. 33.)* **sciav.fr/949adenot**

AFP

Facebook

Le suivi de centaines de milliers d'enfants sur plusieurs années confirme la sécurité des vaccins ARN contre le Covid-19. Ils ne présentent pas plus de malformations congénitales que les enfants de femmes non vaccinées. **sciav.fr/949arncov**

33 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages

MAGAZINE-LIVRE

Trimestriel

ŠKODA

Conçues pour tout.
Même conduire.

A 0 g CO_2/km
B
C
D
E
F
G

www.skoda.fr

Volkswagen Group France – SAS - Capital : 198 502 510 € – 11, av. de Boursonne – 02600 Villers-Cotterêts – RCS Soissons 832 277 370.

Pensez à covoiturer **#SeDéplacerMoinsPolluer**